



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

ÁREA DE INGENIERÍA TÉRMICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN DE LOS REGÍMENES DE  
FLUIDIZACIÓN EN UN LECHO FLUIDO BIDIMENSIONAL  
MEDIANTE SIMULACIONES MULTIFÁSICAS**

AUTOR: ÁNGEL SÁNCHEZ GÓMEZ

TUTOR: FERNANDO HERNÁNDEZ JIMÉNEZ

NOVIEMBRE 2012

## ÍNDICE

### NOMENCLATURA

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivo del estudio.	9
1.2	Alcance del estudio.	10
1.3	Estructura de la memoria.	11
<b>2</b>	<b>CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN</b>	<b>13</b>
2.1	El fenómeno de la fluidización.	13
2.2	Comportamiento fluido de un lecho fluidizado.	19
2.3	Calidad de la fluidización.	21
2.4	Caracterización y propiedades de las partículas constituyentes de un lecho.	22
2.5	Clasificación de las partículas de fluidización.	24
2.6	Formación de burbujas durante la fluidización.	27
2.7	Ventajas e inconvenientes de la aplicación de lechos fluidizados.	28
2.8	Aplicaciones industriales de la fluidización.	30
2.8.1	Operaciones físicas.	31
2.8.1.1	Intercambio de calor.	31
2.8.1.2	Recubrimientos de objetos metálicos.	32
2.8.1.3	Adsorción.	32
2.8.1.4	Secado de sólidos.	32
2.8.2	Reacciones de síntesis.	33
2.8.3	Craqueo de hidrocarburos.	33
2.8.3.1	Craqueo catalítico fluido.	34
2.8.3.2	Craqueo térmico.	34
2.8.4	Combustión.	35

2.8.4.1	Combustión de carbón.	35
2.8.4.2	Incineración de residuos sólidos.	35
2.8.5	Gasificación.	36
2.8.5.1	Gasificación de carbón.	36
2.8.5.2	Gasificación de residuos sólidos.	37
2.8.6	Activación de carbón.	37
2.8.7	Calcinación.	38
<b>3</b>	<b>MÉTODO TEÓRICO</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN</b>	<b>46</b>
4.1	Características geométricas.	46
4.2	Características del lecho.	48
4.3	Características computacionales.	50
<b>5</b>	<b>CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA</b>	<b>52</b>
5.1	Preproceso.	52
5.2	Configuración del problema (Problem Setup). Proceso.	54
5.2.1	General (General).	55
5.2.2	Modelos (Models).	56
5.2.3	Materiales (Materials).	58
5.2.4	Fases (Phases).	59
5.2.5	Condiciones de contorno (Boundary Conditions).	64
5.2.6	Valores de referencia (Reference Values).	65
5.2.7	Consideraciones (“Cell Zone Conditions “Dynamic Mesh”).	65
5.3	Solución (Solution). Proceso.	66
5.3.1	Métodos de solución (Solution Methods).	66

## ÍNDICE

5.3.2	Controles de la solución (Solution Controls).	67
5.3.3	Monitores (Monitors).	68
5.3.4	Inicialización de la solución (Solution Initialization).	71
5.3.5	Actividades de cálculo (Calculation Activities).	74
5.3.6	Ejecución del cálculo (Run Calculation).	74
5.4	Resultados (Results). Postproceso.	75
5.4.1	Gráficos y animaciones. (Graphics and Animations).	75
5.4.2	Representaciones (Plots).	77
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	79
6.1	Análisis de la fracción de volumen.	81
6.2	Análisis de la desviación estándar de la fracción de volumen.	84
6.3	Análisis de la amplitud de la fracción de volumen.	86
7	CONCLUSIONES	95
7.1	Caracterización de los regímenes de fluidización del lecho.	95
7.2	Estudios posteriores.	97
8	BIBLIOGRAFÍA	98

## NOMENCLATURA

### NOMENCLATURA

$C_D$	coeficiente de arrastre, adimensional
$d_i$	diámetro, m
$D_b$	diámetro de burbuja, m
$e_{ss}$	coeficiente de restitución, adimensional
$g_{0,ss}$	coeficiente de distribución radial, adimensional
$K_{gs}$	coeficiente de difusión de la energía granular, adimensional
$p$	presión, Pa
$\vec{g}$	aceleración de la gravedad, m/s <sup>2</sup>
$h$	altura del lecho, m
$H$	altura del depósito, m
$U_{br}$	velocidad de ascenso de burbuja, m/s
$\vec{v}_i$	vector de velocidad, m/s
$t$	tiempo, s
$U$	velocidad superficial, m/s
$U_c$	velocidad umbral entre régimen de slugging y régimen turbulento, m/s
$U_s$	velocidad umbral entre régimen burbujeante y régimen de slugging, m/s
$U_{mb}$	velocidad mínima de burbujeo, m/s
$U_{mf}$	velocidad mínima de fluidización, m/s

## NOMENCLATURA

$x$	posición vertical, m
$y$	posición horizontal, m

### *Letras griegas*

$\alpha_i$	fracción de volumen, adimensional
$\Theta_s$	temperatura granular, $m^2/s^2$
$\tilde{\tau}_s$	tensor de tensiones de la fase solida, Pa
$\mu_i$	viscosidad tangencial, kg/s m
$\mu_{s,col}$	viscosidad de colisión de sólidos, kg/s m
$\mu_{s,kin}$	viscosidad cinética, kg/s m
$\mu_{s,fr}$	viscosidad de difusión de la temperatura granular, kg /s m
$\rho_i$	densidad, $kg/m^3$

### *Subíndices*

$g$	gas
$i$	índice general
$s$	sólidos
$T$	Tensor de tensiones

### 1 INTRODUCCIÓN

La fluidización es un fenómeno que cuenta con cierta experiencia dentro de la ingeniería. La primera aplicación industrial de la fluidización data a principios de la década de 1940s, con procesos de craqueo catalítico y, desde entonces, ha ido expandiendo su utilidad en otras muchas áreas industriales. A lo largo de su desarrollo la fluidización ha contado con el esfuerzo aunado de un gran número de investigadores, y son numerosos los estudios que se han publicado a cerca de muchos de los aspectos de este fenómeno. Cabe destacar que los estudios de investigación no siempre han sido fáciles, resultando complicada la tarea de enunciar teorías y correlaciones que presentaran uniformidad y validez para diversos tipos de configuraciones de lecho fluidizado. La mayoría de los estudios se han hecho en base instalaciones de pequeña y mediana escala, y su comportamiento no siempre ha podido ser extrapolado a instalaciones de mayor tamaño, por lo que el diseño de aplicaciones industriales de gran tamaño ha requerido un cuidadoso escalado, estudios específicos y numerosas pruebas previas antes de la puesta en funcionamiento.

Para caracterizar el comportamiento de los lechos fluidizados, se han desarrollado diversos métodos, basados, por ejemplo, en la pérdida de carga en la base del lecho, la velocidad de ascenso de las burbujas, la fracción de vacío o la concentración de fase sólida, o las fluctuaciones de presión medidas durante la fluidización. También se han propuesto otras técnicas o métodos más sofisticados que utilizan sensores ópticos, rayos láser o tomografía para caracterizar el funcionamiento de un lecho fluidizado.

De todos estos métodos anteriormente mencionados, el que ha sido el referente por encima de todos los demás para la caracterización de un lecho fluidizado, y que ha propuesto correlaciones de gran relevancia ha sido el método de la pérdida de carga en el lecho. Esto ha sido posible gracias a que su ejecución práctica es relativamente sencilla y aporta resultados de elevada fiabilidad.

El método de las fluctuaciones de presión fue propuesto posteriormente. Es de gran popularidad puesto que es simple y fácil de implementar en aplicaciones industriales. En adición, cabe mencionar, que proporciona suficiente información para caracterizar el comportamiento del lecho fluidizado y se ha demostrado su fiabilidad.

El método de cálculo de la fracción de volumen, no tan utilizado en aplicaciones industriales, en sus primeros estudios para caracterizar el

## INTRODUCCIÓN

comportamiento del lecho, debido que, sobre el campo, no es tan sencillo como colocar una sondas de presión en ciertos puntos del lecho, sino que requiere de tecnología más sofisticada como tomografías de capacitancia eléctrica, aporta gran cantidad de información, ya que la fracción de volumen de sólido, o la fracción de vacío (parámetros directamente relacionados), conllevan una gran cantidad de información intrínseca del comportamiento del lecho.

En cuanto a la simulación de lechos fluidizados por computador, CFD (Computational Fluid Dynamics) generalmente se utilizan dos modelos distintos, el modelo de partícula discreta (DPM, Discrete Particle Model) y el modelo de dos fluidos (TFM, Two-Fluid Model).

Respecto al DPM, que está basado en el enfoque Euleriano-Lagrangiano, la fase gas se trata como una fase continua, descrita por las ecuaciones de Navier-Stokes, localmente promediadas a escala de celda computacional. El movimiento de las partículas esta modelado con el de una fase discreta, gobernada por las leyes de Newton del movimiento a escala de una partícula individual, teniendo en cuenta la interacción partícula-partícula y la interacción partícula-pared.

En el TFM, modelo basado en un enfoque Euleriano-Euleriano, ambas fases, gas y solido, son tratadas como un continuo completamente interpenetrado. Estas fases son descritas mediante diferentes ecuaciones de masa y momento, con los términos de interacción adecuados para aunar las dos fases. Esto significa que en lugar de conocer la posición y velocidad de cada partícula, solo la fracción de volumen de cada fase y el promedio de flujo de volumen son conocidas. En la práctica las partículas deberían ser tratadas como discretas, pero, esto resulta computacionalmente demasiado costoso, y sólo  $< 10^6$  partículas pueden ser simuladas con la capacidad computacional actual, haciendo al modelo DPM menos atractivo a la hora de simular lechos fluidizados.

Cabe señalar que FLUENT 12.1.2 CFD software basa su cálculo en el modelo TFM.



## INTRODUCCIÓN

### Objetivo del estudio

El objetivo del estudio es caracterizar los distintos regímenes de fluidización de un lecho fluidizado a través de simulaciones que se van a realizar utilizando en programa de cálculo FLUENT 12.1.2 CFD software. El estudio se realizara en base en base al artículo científico de Y. T. Makkawi et al., 2002 [2]. Este articulo, de carácter experimental, basa su estudio en el método de la fracción de volumen, así como en el método de pérdida de carga en la base del lecho, aunque este último es el que tiene mayor relevancia, y aporta más cantidad de información. A través de estos métodos, caracteriza los regímenes de fluidización de un lecho fluidizado. En concreto se pretende caracterizar tres regímenes de fluidización distintos, que son el régimen de burbujeo, el régimen de slugging, y el régimen turbulento. En el artículo también se aumenta la velocidad hasta llegar al régimen de transición y al régimen de fluidización rápida, pero cuando existe transporte neumático de partículas no podemos hablar ya de lecho fluidizado, como se mencionará más adelante. El procedimiento de estudio se basa en estudiar dos velocidades de gas dentro de los dos primeros regímenes de fluidización nombrados, y tres dentro del tercero, partiendo de una velocidad ligeramente superior a la de mínima fluidización. Obteniendo en total siete casos, dos para cada régimen de fluidización excepto para el último que contará con tres, debido a que este régimen aparece en un intervalo mayor de velocidad del fluido.

Dicho esto, los objetivos del estudio son:

- La simulación de un lecho fluidizado mediante programa de ordenador, simulándolo utilizando dos modelos de arrastre distintos, el modelo de Gidaspow y el modelo de Syamlal–O’Brien. Será de importancia ver las diferencias y similitudes que guardan los dos modelos.
- La comparación de estos resultados se hará con los resultados experimentales que refleja el artículo en base al cual se realizara el estudio, es decir, si se corresponden los distintos regímenes de fluidización reflejados en las simulaciones con los obtenido experimentalmente, para ambos modelos de simulación. Para ello se compararan las graficas de desviación estándar de fracción de volumen promediada a lo largo de una línea frente a velocidad del gas, y las de

## INTRODUCCIÓN

desviación estándar de la amplitud de la señal de fracción de volumen frente a velocidad del gas.

- Se calcularán las graficas de densidad de probabilidad de la amplitud de la señal de fracción de volumen de sólidos para cada una de las velocidades.

En resumen, la idea es implementar un caso real a través simulaciones por ordenador, usando dos modelos, y comparar los resultados que se obtengan con dicho caso. De este modo se podrá, comparar estas simulaciones entre sí, para establecer diferencias y similitudes entre modelos y, además, comparar cada uno de los modelos con un caso real experimental.

### 1.2 Alcance del estudio

La simulación computacional utilizando FLUENT 12.1.2 CFD software requiere establecer criterios de limitación en cuanto al mallado, intervalo de tiempo por iteración, orden de resolución de las ecuaciones que utiliza dicho programa, etc. Ésta última debido a que la potencia de los ordenadores a disposición académica presentan también limitaciones de cálculo. De tal modo que las características de estas simulaciones están, lo más próximas posible al equilibrio entre precisión y velocidad de cálculo.

Se requiere una simulación independiente para cada velocidad, y al ser siete velocidades por modelo, y dos modelos distintos, se necesitara llevar a cabo catorce simulaciones independientes. Para ello se ha configurado el programa para que genere tres archivos de datos por simulación, uno de ellos de presión en la base del lecho, y dos de fracción de volumen a dos alturas distintas de la parte inferior del lecho, para paliar las posibles irregularidades que pudiesen darse (debido a las burbujas) al solo utilizar una altura. Cada uno de estos archivos de datos constará de 20000 medidas.

Los términos clave del estudio son, regímenes de funcionamiento, método de la fracción de volumen de sólido, simulación computacional, comparación de simulación con caso experimental y comparación de distintos modelos de arrastre.

### 1.3 Estructura de la memoria

La memoria del estudio se distribuye en seis capítulos, al margen de este capítulo de introducción, que se estructura del siguiente modo:

- **Capítulo 2. Conceptos de fluidización.** Describe el fenómeno de fluidización, características y particularidades de éste, modos en los que se puede encontrar y algunas de las más usuales aplicaciones industriales.
- **Capítulo 3. Método teórico.** Base matemática que utiliza el programa FLUENT 12.1.2 CFD software. Ecuaciones que internamente lo integran, para ambos modelos teóricos de arrastre.
- **Capítulo 4. Descripción de la simulación.** Explicación de la geometría del lecho físico y de las características de la simulación que se dispone a realizar.
- **Capítulo 5. Configuración del programa de cálculo.** Detalla los pasos a seguir para la configuración de FLUENT 12.1.2 CFD software de cara a realizar las simulaciones. Además, no solo servirá para configurar el caso concreto que nos ocupara, sino que este capítulo tendrá un carácter didáctico de cara a realizar otras simulaciones basadas en un modelo multifásico euleriano.
- **Capítulo 6. Análisis de los resultados.** Incluye los resultados de las simulaciones llevadas a cabo, las graficas e información fruto del tratamiento de los datos obtenidos, comparaciones entre los dos modelos y comparaciones de estos dos con el caso experimental que se pretende simular.
- **Capítulo 7. Conclusiones.** Presenta las conclusiones obtenidas del proyecto, así como posibles trabajos futuros.

## INTRODUCCIÓN

### **Referencias bibliográficas capítulo 1**

[5] Apartado 1

[8] Apartado 1

### 2 CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

En lo consecutivo del capítulo, se realizará una introducción al fenómeno de fluidización, donde se definirán algunas de sus principales características de comportamiento, así como los diferentes estados o regímenes en los que puede encontrarse.

Se tratará el tema de la importancia de las propiedades de las partículas que son sometidas a fluidización y de cómo éstas afectan al comportamiento del lecho, es decir, de cómo se forman las burbujas en éste y sus características.

Este fenómeno tiene lugar en muchas aplicaciones, y fundamenta estudios experimentales de caracterización hidrodinámica.

Después de esto se comentarán algunas ventajas e inconvenientes, sus aspectos más favorables y desfavorables y de qué manera afectan diversos factores en su buen funcionamiento.

Para finalizar serán descritas algunas de las aplicaciones industriales de la fluidización, y se podrá comprobar su presencia en varios sectores industriales.

#### 2.1 El fenómeno de la fluidización

Fluidización se define como un fenómeno en el cual un lecho de partículas sólidas se suspende en el seno de un gas o líquido, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido.

Si un fluido, con velocidad vertical ascendente, siendo esta considerada baja, atraviesa el lecho de finas partículas, al principio el fluido se filtra por los espacios entre partículas, que permanecen estáticas. Este estado se denomina lecho fijo, y con un incremento de la velocidad del fluido, estas partículas se empiezan a mover de manera independiente, mediante pequeñas vibraciones.

Se continúa aumentando la velocidad progresivamente, y llega un punto en el que las partículas se quedan suspendidas en el flujo de fluido. En este punto la

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

fuerza de fricción entre partícula y fluido se iguala al peso de esta. Desaparece por lo tanto la componente vertical de la fuerza en el lecho de partículas. De este modo la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas adyacentes por unidad de área. Dicho de otro modo:

$$\Delta P = h \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_m) \quad (2.1)$$

donde  $\Delta P$  es la presión estática en la base del lecho,  $h$  es la altura del lecho fijo,  $\rho_p$  la densidad de partícula y  $\varepsilon_m$  la fracción de vacío.

Esta fracción de vacío,  $\varepsilon_m$ , representa la fracción de volumen de vacío que hay en el lecho en relación con las partículas sólidas. De tal modo:

$$\alpha_s = 1 - \varepsilon_m \quad (2.2)$$

Este estado se denomina como lecho en comienzo de fluidización, y marca la transición entre el lecho fijo y el lecho totalmente fluidizado. La velocidad vertical del fluido en este punto se define como velocidad mínima de fluidización,  $U_{mf}$ .

En la Figura 2.1, se puede observar de manera grafica este proceso progresivo mediante el cual el lecho queda completamente fluidizado.

En sistemas fluidizados por líquido, un aumento de la velocidad por encima de la de mínima fluidización, normalmente da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho. De esta manera se amortiguan las posibles inestabilidades que el flujo de líquido pueda ocasionar, y no se observan heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Un lecho que presente estas características se denomina lecho de fluidización particulada, no burbujeante u heterogénea. En sistemas fluidizados por gas resulta poco frecuente la aparición de este comportamiento de fluidización, salvo en ciertos casos con partículas muy ligeras con gas denso a alta presión.

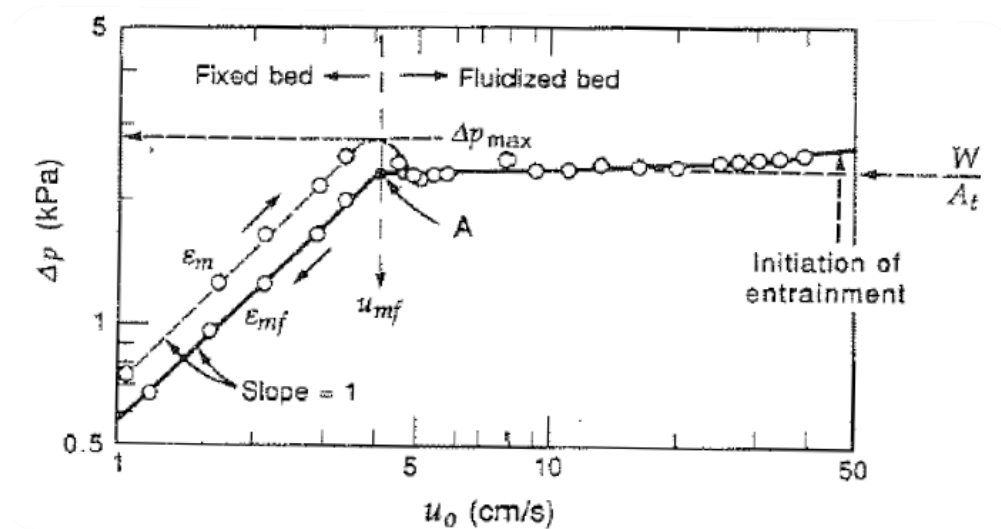


Figura 2.1. Gráfica presión frente a velocidad para un lecho fluidizado con arena fina de tamaño uniforme [1].

Generalmente el comportamiento de los lechos fluidizados por gas es bien diferente. De este modo, al producirse un incremento en la velocidad del gas por encima de la correspondiente a la de mínima fluidización, se presentan grandes inestabilidades que dan lugar a la formación de burbujas y canales. Al aumentar la magnitud de la velocidad, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más intenso. El lecho no se expande mucho más de su volumen de mínima fluidización. Un lecho de este comportamiento se denomina de fluidización agregativa, burbujeante o heterogénea. En ocasiones concretas, los lechos fluidizados por líquido también se comportan como lechos burbujeantes, como en lechos con sólidos muy densos, fluidizados con líquidos de baja densidad.

Los lechos fluidizados tanto por líquido como por gas se consideran lechos fluidizados de fase densa, porque existe un límite superior que define con claridad la superficie del lecho de partículas.

En sistemas o lechos fluidizados por gas, a velocidades por encima de la de mínima fluidización se produce la coalescencia de burbujas de fluido gas y el crecimiento de estas a medida que ascienden por el lecho. En ocasiones en lechos de mucha altura en comparación con el diámetro las burbujas llegan a ser tan grandes que ocupan todo el lecho de manera transversal. Este fenómeno

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

recibe el nombre de slugging, caracterizado por burbujas de diámetro próximo al del depósito, denominadas slugs. Pueden aparecer tres tipos de slugging, dependiendo del tamaño de las partículas del lecho.

En el caso de las partículas más finas y lisas, estas caen suavemente hacia abajo por la pared que rodea las burbujas, dando lugar a burbujas de elevado tamaño, pero que nunca llegan a tocar la burbuja de fluido con la pared del depósito. El fenómeno se conoce como slugging con slugs axiales.

Para partículas ásperas de tamaño pequeño, con paredes ásperas y velocidades altas, la burbuja asciende como en el caso de slugs axiales pero en los tramos superiores del lecho la burbuja se adhiere a la pared del depósito perdiendo la simetría, o casi simetría de ascenso. Este fenómeno se conoce como slugs de pared.

Para partículas de mayor diámetro, la fracción de lecho por encima de la burbuja es empujada hacia arriba, como un pistón, sin que se caiga por los lados de ésta. Las partículas caen desde el slug, que finalmente se desintegra. A partir de dicho instante se forma un nuevo slug, y así en lo sucesivo. Este fenómeno se denomina slug plano.

El fenómeno del slugging se tiene que tener muy en cuenta en el diseño de lechos con depósitos estrechos y largos.

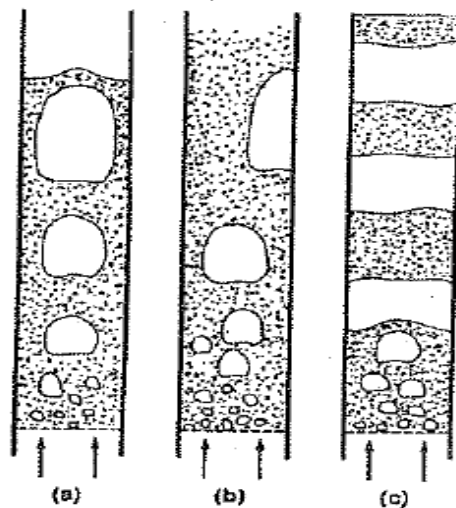


Figura 2.2. Tipos de slugs en lechos fluidizados [1]. (a) Slugs axiales; (b) Slugs de pared; (c) Slugs planos;



## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

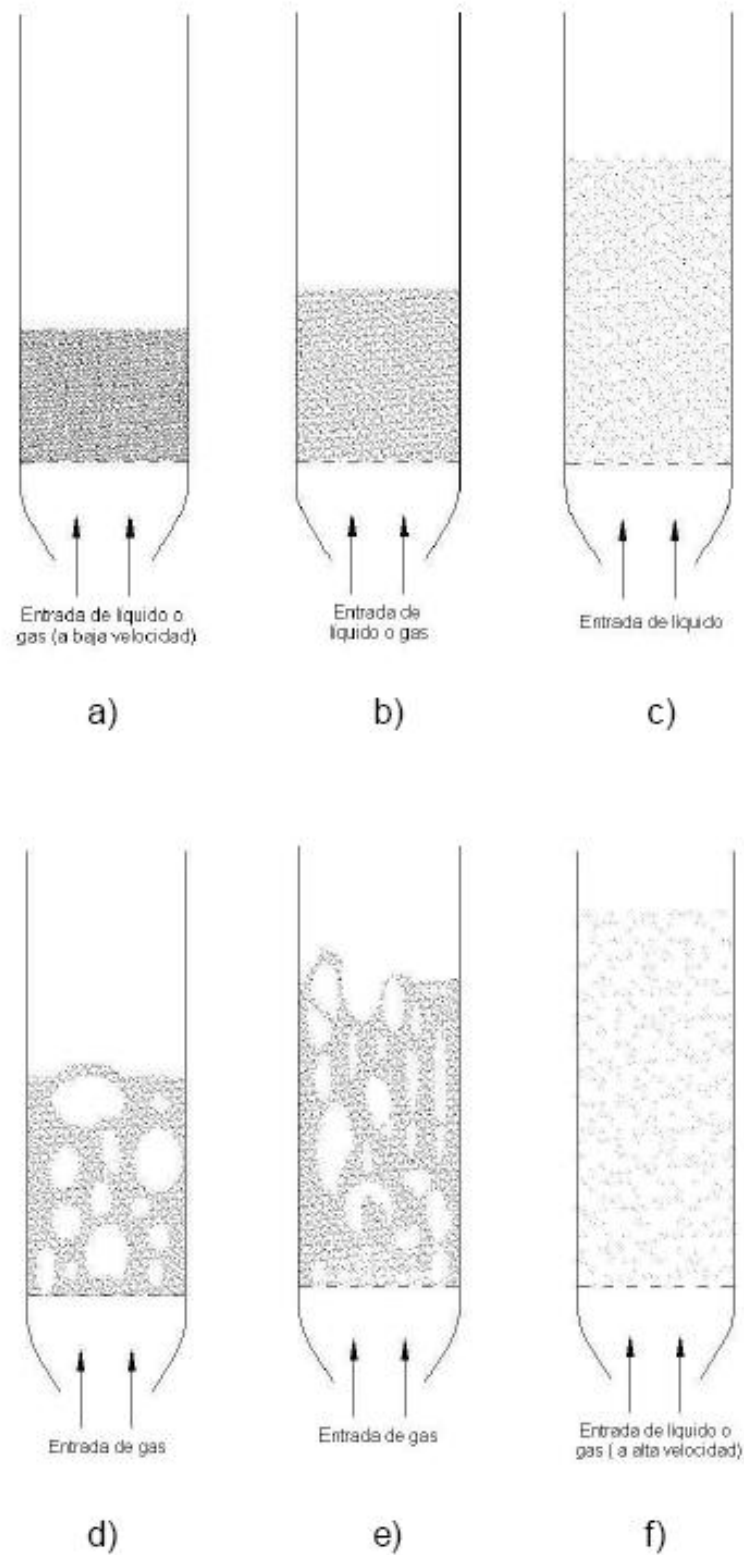


Figura 2.3. Distintos modos de contacto entre lecho de partículas y fluido [1].

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

En la fluidización de partículas finas a una velocidad del gas lo suficientemente alta, se supera el valor de la velocidad terminal de los sólidos. En este momento el arrastre de partículas por parte del fluido llega a ser apreciable, con lo que desaparece la superficie superior del lecho y, en lugar de burbujas se aprecia un movimiento turbulento de grupos de sólidos y espacios de gas de varios tamaños y formas. Este estado se denomina de lecho fluidizado turbulento.

Con un aumento de la velocidad del gas aun mayor, las partículas abandonan el lecho con el gas. Este régimen de funcionamiento se denomina lecho fluidizado de fase dispersa con transporte neumático de partículas.

Así como en la fluidización turbulenta como en la de fase dispersa con arrastre neumático de partículas, se arrastran grandes cantidades de partículas que es necesario recuperar y devolver al lecho. Esta función la desempeñan los ciclones, que son unos elementos de sedimentación que actúan gracias a la fuerza centrífuga. Los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas son conocidos como lechos fluidizados circundantes. En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos. En los lechos fluidizados de fase dispersa, donde el arrastre de partículas es más cuantioso, se emplean, por lo general, grandes ciclones fuera del lecho.

En general, en los lechos fluidizados circundantes es crucial, para que tenga un funcionamiento adecuado, que la recirculación de partículas a través de los elementos de retención se suave y uniforme.

Otro modo de contacto sólido-gas se observa en el lecho de chorro. En condiciones de funcionamiento un chorro de gas a alta velocidad penetra a través de un lecho de partículas transportando así algunas de éstas hasta la parte superior del lecho. El resto de partículas caen lentamente a través de la zona circundante al chorro, a través del gas que se filtra hacia arriba. Se puede observar un comportamiento mixto, entre burbujeante y de chorro, así este sistema es denominado lecho fluidizado de chorro, como se aprecia en la Figura 2.4 c).

En comparación con otros modos de contacto sólido-gas, el lecho fluidizado tiene algunas propiedades de gran utilidad. En el caso de lechos fluidizados de contacto sólido-líquido, la utilidad es menor debido fundamentalmente a su comportamiento. Teniendo en cuenta esto, hasta ahora las aplicaciones industriales de fluidización mediante lechos fluidizados más importantes son de contacto sólido-gas.

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

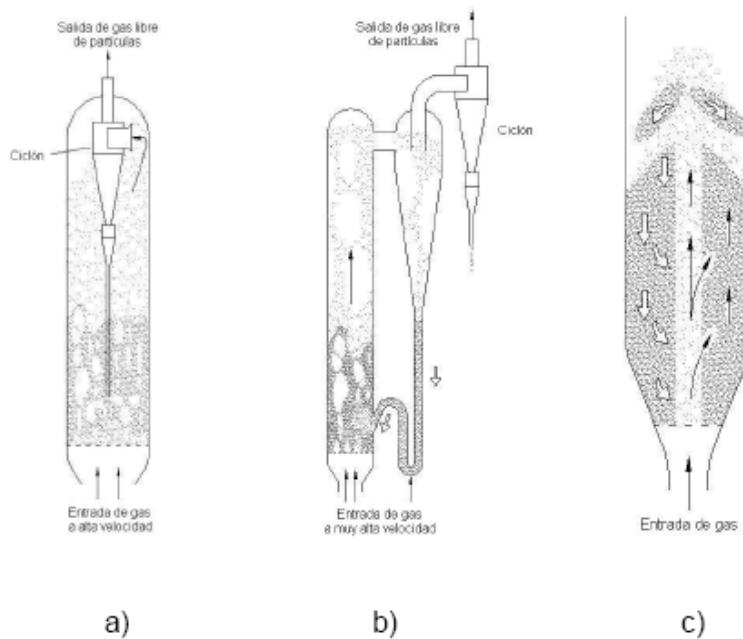


Figura 2.4. a) Lecho fluidizado turbulento con ciclón interno [1]; b) Lecho fluidizado de fase dispersa con ciclón externo; c) Lecho de chorro.

### 2.2 Comportamiento fluido de un lecho fluidizado.

Si un lecho de partículas de fase densa es fluidizado con gas, su comportamiento se asemeja, en muchos aspectos, al comportamiento de un fluido.

De esta manera un objeto de tamaño grande, en relación a las partículas, y de menor densidad, es sumergido en el interior del lecho, y se deja libre, este sale a la superficie y flota, al igual que ocurriría con cualquier fluido de mayor densidad. Se aprecia en la Figura 2.5 a)

Además, si se inclina el depósito que aloja en su interior el lecho, la superficie de este último se mantiene horizontal, al igual que en un depósito que albergara en su interior cualquier fluido. Esto es debido al potencial gravitatorio. Figura 2.5 b).

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

Si, se conectan dos lechos independientes, se igualan sus niveles en el caso de ser estos diferentes, a través del conducto conector. Las partículas del lecho fluyen de uno a otro para igualar sus potenciales.

También, si se practica un orificio en la parte inferior, del depósito y del lecho, el contenido de partículas del lecho fluirá fuera del depósito bajo las propiedades de un líquido, formando un chorro de partículas. Figura 2.5 f).

En adicción a todo lo anterior, cabe señalar que la diferencia de presión en dos puntos del lecho es directamente proporcional a la diferencia de alturas. Figura 2.5 d)

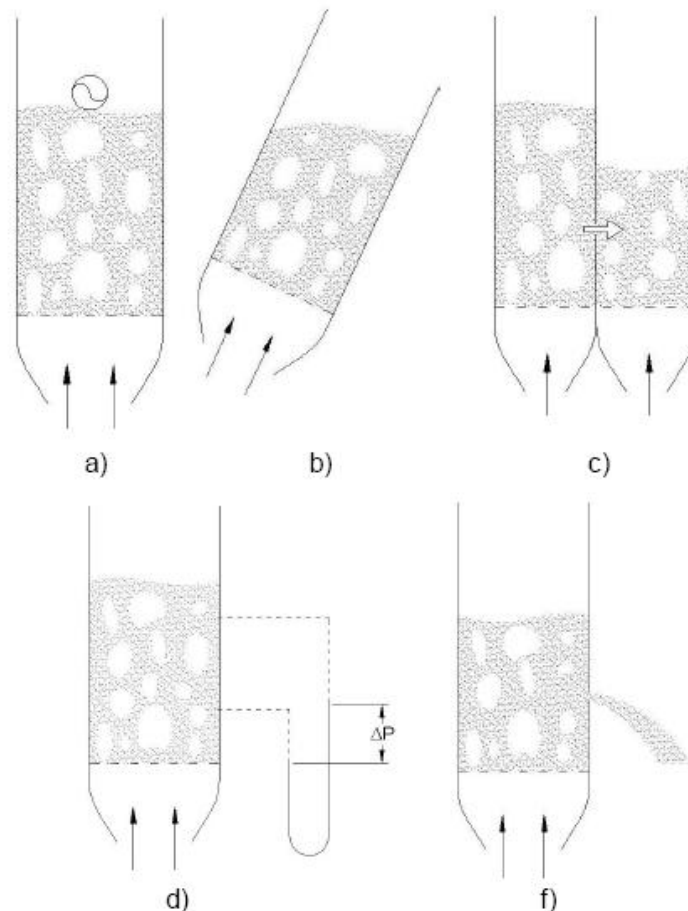


Figura 2.5. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado de partículas [1].

### 2.3 Calidad de fluidización.

El término fluidización engloba tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, pero es en los de fase densa donde se concentran los estudios de investigación y las tareas que estos conllevan.

La capacidad para fluidizar de las partículas que componen el lecho, en reposo, lecho fijo, varía mucho de unos sistemas a otros y están influidos por múltiples factores.

El primero de estos factores fundamentales es el tamaño de los sólidos y que distribución guardan estos.

Por lo general las partículas pequeñas tienden a aglomerarse si están húmedas, por lo que se precisa de una agitación en el lecho para garantizar su buen funcionamiento, es decir, sus condiciones de fluidización. Esta tarea puede ser realizada por agitadores mecánicos, o funcionando con velocidades de gas relativamente altas, utilizando la energía cinética del gas como agitador de las partículas sólidas. Las partículas finas con una amplia distribución de tamaños son capaces de fluidizar en un amplio rango de velocidades del gas, permitiendo operaciones con lechos profundos y grandes, ofreciendo cierto grado de flexibilidad.

Por el contrario, los lechos constituidos por partículas grandes con distribución de tamaños uniforme suelen fluidizar peor, ya que suelen aparecer sacudidas, chorros y slugging, lo que puede ser perjudicial y dañino para la instalación, y causar daños estructurales en la estructura. Esto ocurre en lechos de gran tamaño. Este problema se puede solucionar añadiendo pequeñas cantidades de partículas más finas, que actúan como lubricante de las partículas más grandes. El rango de velocidades, para lechos constituidos por partículas más gruesas, es mucho menor. Por lo dicho anteriormente, los lechos constituidos por partículas más gruesas deben ser poco profundos a la hora de fluidizarse.

El segundo de los factores fundamentales que condicionan la calidad de la fluidización, es la relación de densidades entre el fluido y las partículas. Normalmente los lechos por contacto sólido-líquido, fluidizan de manera homogénea, mientras que los lechos por contacto sólido-gas, suelen presentar heterogeneidades. A pesar de ello, es posible observar comportamientos atípicos con partículas de baja densidad en gases de densidad elevada o con partículas de alta densidad con líquidos poco densos.

Existen otros factores que afectan a la calidad de la fluidización, y a la fluidización en sí; como son la geometría del lecho, los dispositivos de alimentación de gas, el tipo de partícula utilizada. En adición a lo último expuesto, la geometría y tamaño de las burbujas dependen de los dispositivos de alimentación de gas ubicados en la parte inferior del depósito.

### 2.4 Caracterización y propiedades de las partículas constituyentes de un lecho.

La magnitud con la que se determina la masa de las partículas es la densidad de partícula  $\rho_p$ , definida como la relación entre la masa de una partícula,  $m_p$ , y el volumen hidrodinámico de esta,  $V_h$ . Se entiende por volumen hidrodinámico el volumen visto por el fluido en su interacción con la partícula, e incluye el volumen de todos los poros que esta pueda tener.

En partículas no porosas se puede medir la densidad de partícula con la ayuda de aparatos de medida como el picnómetro pero estos no se pueden utilizar con partículas porosas porque dan el valor de la densidad absoluta,  $\rho_{abs}$  (masa de partícula entre volumen de material sólido que compone la partícula) y esta no es apropiada cuando se estudia la interacción con un fluido. En partículas porosas, la densidad de partícula no es fácil de medir directamente aunque se han propuesto varios métodos para hacerlo.

Existe otro concepto que permite caracterizar el lecho de partículas. Este es la densidad aparente del lecho,  $\rho_b$ , que define el cociente entre la masa de todas las partículas que forman el lecho,  $m_b$ , y el volumen que ocupan, incluyendo los espacios vacíos entre ellas, denominado volumen aparente,  $V_{ap}$ .

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (2.3)$$

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

A partir de la fracción de vacío del lecho fijo,  $\varepsilon_m$ , que, como se ha definido, representa la relación entre el volumen de espacios entre partículas del lecho, es decir, los espacios vacíos, y el volumen aparente de éste. Se puede establecer las diferencias entre las densidades del lecho y de partícula.

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \quad (2.4)$$

$$\rho_p = \frac{\rho_b}{1 - \varepsilon_m} \quad (2.5)$$

El tamaño de las partículas esféricas puede ser cuantificado sin ambigüedad. Las dificultades se presentan con las partículas no esféricas. El tamaño de las partículas más grandes (  $> 1 \text{ mm}$  ) puede ser medido con calibradores o micrómetros si las partículas son regulares en la forma, ser pesadas cierto número de partículas si su densidad es conocida, o mediante desplazamiento de líquido si estas no son porosas. Para estas medidas, lo primero que se calcula es el diámetro esférico como sigue:

$$d_{sph} = \left( \begin{array}{l} \text{diámetro de la esfera que tiene el} \\ \text{mismo volumen que la partícula} \end{array} \right)$$

Varios criterios de no esfericidad están disponibles. Se muestra a continuación el método de un parámetro para medir la esfericidad:

$$\phi_s = \left( \frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right)_{\text{para un mismo volumen}}$$

Siendo este 1 para esferas puras, y  $0 < \phi_s < 1$  para el resto de partículas.

### 2.5 Clasificación de las partículas de fluidización.

La capacidad y la manera en que las diferentes partículas fluidizan varían según la naturaleza de estas. Geldart formula una clasificación de estas partículas clasificándolas en cuatro grupos distintos, A, B, C y D, basándose en sus propiedades de fluidización estando bajo condiciones ambiente. Esta clasificación es la que más se utiliza en todos los campos de la tecnología de partículas.

Las partículas que al ser fluidizadas por aire en condiciones ambiente, como anteriormente se dijo, muestran un estado de fluidización no burbujeante, a la velocidad mínima de fluidización, seguido de un estado burbujeante a medida que la velocidad del aire va aumentando se clasifican dentro del grupo A. Las partículas que bajo estas condiciones ambiente solo presentan fluidización burbujeante forman el grupo B. El grupo C lo constituyen partículas muy finas y cohesivas, que son incapaces de fluidizar. Finalmente, aquellas partículas de mayor tamaño constituyen el último grupo, el grupo D, caracterizándose por formar lechos de chorro.

Las propiedades que presentará una partícula fluidizada con aire se pueden predecir si esta se encuentra dentro de uno de estos 4 grupos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si la fluidización se realiza a temperaturas o presiones distintas de la atmosférica puede suponer que una partícula muestre un comportamiento propio de un grupo diferente al que pertenecería operando bajo condiciones estándar.

En los sistemas de uso comercial, el estado de fluidización que más comúnmente se encuentra es el burbujeante, puesto que el rango de velocidades de gas en el que tiene lugar el estado no burbujeante en partículas pertenecientes al



## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

grupo A es muy reducido. La velocidad de gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad mínima de burbujeo,  $U_{mb}$ .

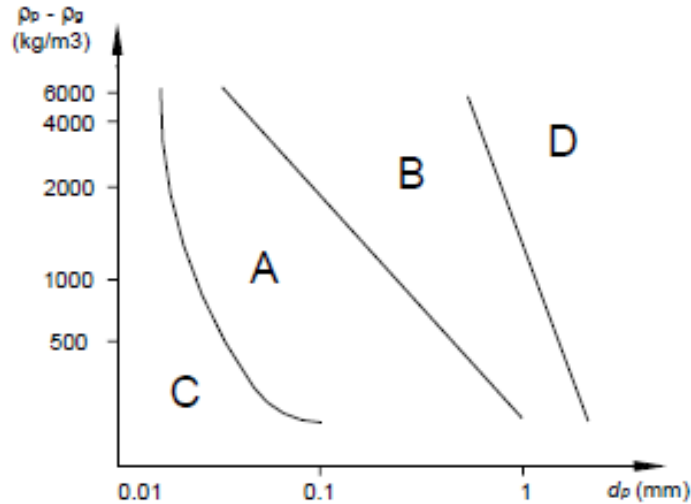


Figura 2.8. Clasificación de Geldart de las partículas según su peso y tamaño [6].

En las partículas que pertenecen al grupo A de Geldart, donde  $U_{mb} > U_{mf}$ , las burbujas se dividen y coalescen de manera continua existiendo un tamaño máximo de burbuja alcanzado. Por esto la fluidización es suave y de buena calidad.

En las partículas de los grupos B y D, con  $U_{mb} = U_{mf}$ , las burbujas crecen uniformemente, sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo de burbuja alcanzado (solo siendo este limitado por el diámetro máximo del lecho). Por esta razón la fluidización es de peor calidad y en ella se dan grandes fluctuaciones de presión.

En el grupo C, las fuerzas entre partículas son más grandes, en comparación a las fuerzas de inercia ocasionadas por el gas ascendente de fluidización. Por esto, las partículas no son capaces de adquirir la separación necesaria y la fluidización no tiene lugar. No se forman burbujas sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. En cualquier caso, la

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

fluidización se puede conseguir mediante agitadores mecánicos o sometiendo al lecho a regímenes de vibración.

En la Tabla 2.1 se ofrece un resumen las características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización según al grupo al que pertenecen.

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a $U_{mf}$	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina Cemento	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Tabla 2.1. Clasificación de Geldart según el comportamiento de las partículas [6].

### 2.6 Formación de burbujas durante la fluidización.

En este apartado se explica el fenómeno de burbujeo que aparece en lechos fluidizados de fase densa con fluidización burbujeante (generalmente mediante gas). Experimentalmente se ha ido demostrando que un lecho fluidizado se comporta de manera similar a un líquido burbujeante de baja viscosidad.

Así, podemos decir que la forma de las burbujas es parecida en ambos casos: casi esféricas las de pequeño tamaño, alargadas y deformadas cuando crecen, y esféricas con forma de tapón las de mayor tamaño. En los dos casos se observa el ascenso lento de las burbujas más pequeñas, que va siendo más rápido a medida que el tamaño de estas va aumentando, pudiendo una serie de burbujas pequeñas coalescer en una más grande.

Cabe añadir que se ha comprobado de forma experimental que la velocidad de ascenso de las burbujas depende de los mismos factores en los dos casos, pudiendo determinarse con expresiones muy similares. Existe una correlación experimental por la cual la velocidad de ascenso de una burbuja de tamaño grande y de forma esférica en un líquido, es aplicable a una burbuja que se forma dentro de un lecho fluidizado. Esta expresión ha sido desarrollada por Davies y Taylor, y se enuncia del mediante la siguiente expresión:

$$U_{br} = 0.711 \cdot (\bar{g} \cdot D_b)^{1/2} \quad (2.6)$$

donde  $D_b$  es el diámetro de la esfera cuyo volumen es igual al de la burbuja y  $\bar{g}$  la aceleración de la gravedad.

El caudal de aire, al ser introducido en el lecho para que la fluidización se lleve a cabo, se divide en dos partes, una que atraviesa el lecho en forma de burbujas y otra que lo hace mediante emulsión gas-sólido. En efecto, un caudal de gas superior al que se necesitaría para fluidizar el lecho completo, es decir, una velocidad igual a la velocidad de mínima fluidización, supone que pase más cantidad de aire a través del lecho en forma de burbujas, manteniéndose la fase de emulsión en estado de mínima fluidización.

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

Experimentalmente se ha demostrado la existencia de una tercera fase, con características distintas a las existentes dentro de la emulsión o dentro de las burbujas. Esta fase se encuentra alrededor de las burbujas y se denomina nube. De este modo existen modelos de dos fases (fase burbuja y fase emulsión) y modelos de tres fases (fase nube, fase burbuja y fase emulsión). Por lo general, en los modelos de dos fases se considera que la nube forma parte de la emulsión y en los de tres fases se considera la nube como una fase independiente, de modo que intercambian calor y masa a través de las dos interfaces que separan las tres fases.

### **2.7 Ventajas e inconvenientes de la aplicación de lechos fluidizados.**

Los lechos fluidizados muestran ciertas características, algunas deseables y otras que se presentan como desventajas a la hora de operar como lecho fluidizado. Entre los aspectos ventajosos de estos sistemas encontramos:

- El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite desarrollar las operaciones con facilidad.
- La rapidez con la que las partículas se mezclan facilita la consecución de valores de temperatura constantes en todo el lecho, lo que facilita el control de la operación y la hace más simple.
- Un lecho con partículas bien mezcladas resiste de manera eficaz a las variaciones de temperatura. Ofrece una respuesta lenta y uniforme a los cambios bruscos en las condiciones de operación, asegurando, de este modo un magnífico margen de seguridad, evitando, por ejemplo, pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible suministrar (o conservar) grandes cantidades de energía térmica que se puedan necesitar (o producir) en reactores de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor u masa entre gas y partículas son superiores que en otros sistemas de mezclado.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en él es sublime, por lo que los intercambiadores de calor sumergidos en lechos fluidizados requieren una superficie de contacto relativamente pequeña.

Por las razones anteriormente expuestas, los lechos fluidizados se presentan como un recurso ideal a la hora de llevar a cabo ciertas operaciones industriales. No obstante, presentan una serie de desventajas que impiden su desarrollo en ciertas aplicaciones. Las principales desventajas que presentan los lechos fluidizados son:

- En lechos con fluidización burbujeante de partículas finas, la dificultad para definir el flujo de gas supone un mezclado ineficiente. Esto supone un factor de vital importancia cuando es requerida una conversión elevada de reactantes gaseosos o una alta selectividad para una reacción intermedia.
- La rápida mezcla de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variable. En el tratamiento continuo de sólidos, se tiene un producto no uniforme y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión. Para reacciones catalíticas el movimiento de partículas catalizadoras porosas, que continuamente capturan y liberan moléculas de gas reactante, contribuye al mezclado posterior de reactantes gaseosos disminuyéndose así el rendimiento del sistema.

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

- La erosión en depósitos y tuberías debido a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. A su vez las partículas muy finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser remplazadas o reconducidas mediante circuitos diseñados para ese fin.
- En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma significativa.

La ventaja que presentan los lechos en relación a la economía ha permitido su desarrollo exitoso en operaciones industriales. A pesar de todo, ese éxito y aceptación en la industria pasa por entender e intentar superar del mejor modo sus desventajas.

### **2.8 Aplicaciones industriales de la fluidización.**

La fluidización es un fenómeno conocido desde hace relativamente tiempo, y ha encontrado aplicación en diferentes sectores de la industria. De este modo, se emplean lechos fluidizados en diversos procesos físicos como intercambiadores de calor, recubrimientos de objetos metálicos, adsorción de componentes u operaciones de secado. Además, se usan en procesos químicos de distinta naturaleza, como pueden ser las reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación o tratamiento de minerales. Particularmente, en el campo de la biología, una aplicación de los lechos fluidizados, es el cultivo de microorganismos. A continuación se comentan algunas de las aplicaciones industriales más importantes de la fluidización.

### 2.8.1 Operaciones físicas.

#### 2.8.1.1 Intercambio de calor.

Los lechos fluidizados llevan tiempo utilizándose como intercambiadores de calor, debido a su gran capacidad para transferir calor y mantener la temperatura de operación uniforme. Su uso es muy conveniente cuando es necesario enfriar metales o aleaciones de manera rápida, de cara a obtener propiedades concretas que son requeridas. En algunas aplicaciones el intercambio de calor se produce sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración, que circula a través de tubos que se encuentran en el interior del lecho fluidizado. Una aplicación común, teniendo como base esta idea, consiste en hacer circular un caudal de agua por un sistema de tuberías sumergidas en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura, recuperando el calor que estas contienen, y aprovechándolo para producir vapor.

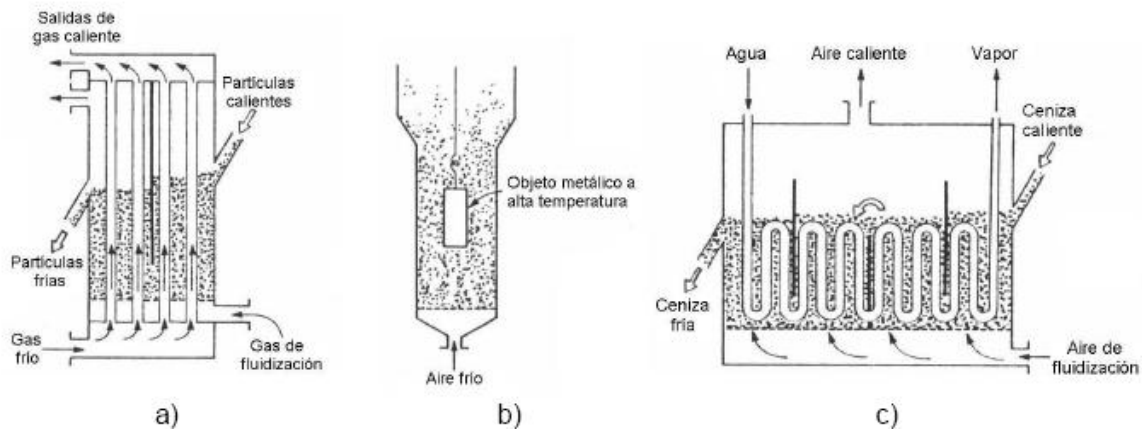


Figura 2.9. Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado [1]. a) Utilizado para enfriamiento rápido de metales. b) Utilizado para el intercambio directo de calor entre gas y partículas. c) Utilizado para la generación de vapor a partir de ceniza caliente.

### **2.8.1.2 Recubrimientos de objetos metálicos.**

Los lechos fluidizados ofrecen la posibilidad de realizar recubrimientos plásticos en objetos metálicos. El procedimiento consiste en fluidizar mediante aire partículas finas del material plástico con el que se desea recubrir la pieza. El objeto a recubrir se sumerge en el lecho, durante un corto periodo de tiempo y a una temperatura superior a la de fusión del plástico. De este modo las partículas se funden adhiriéndose a la superficie del metal, formando una fina capa sobre ella.

### **2.8.1.3 Adsorción.**

En ocasiones, es necesario eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas. Para conseguir esto, se utilizan procesos continuos de adsorción mediante fluidización a través de múltiples etapas, presentando éstos gran efectividad. En la adsorción por lecho fluidizado los componentes se adsorben de forma activa con partículas de carbón activo, y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo) ocurren en el mismo lecho fluidizado. Algunos ejemplos de esta aplicación son la retirada y concentración de solventes como el disulfuro de carbono, acetona, etanol y acetato de etilo, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales.

### **2.8.1.4 Secado de sólidos.**

Los secadores de lecho fluidizado se han empleado en gran número de aplicaciones industriales debido a su capacidad, su bajo coste de construcción, su sencillez de operación y su alta eficiencia térmica. Son apropiados para secar cualquier tipo de sólido húmedo, siempre y cuando este pueda ser fluidizado por



## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

gas caliente. Comercialmente hablando, dentro de sus usos más frecuentes, están el secado de minerales, polímeros, arena, productos farmacéuticos o fertilizantes, siendo numerosos los diseños que se han desarrollado. Por ejemplo, las acerías utilizan grandes lechos para secar el carbón, antes de ser introducido en los hornos, así como las industrias farmacéutica y química emplean en sus procesos lechos de pequeño tamaño, pero muy eficientes.

### **2.8.2 Reacciones de síntesis.**

Los lechos fluidizados resultan más adecuados que los lechos fijos a la hora de desarrollar reacciones en fase gas con catalizadores sólidos. Gracias a la capacidad característica que presentan los lechos fluidizados de mantener la temperatura de manera uniforme en todo el lecho fluidizado, se puede mantener un estricto control de ésta en la zona donde se produce la reacción.

Algunos ejemplos de reacciones de síntesis llevados a cabo mediante procesos de fluidización son: en lecho fluidizado de partículas finas: anhídrido ftálico, acetato de vinilo, acrilonitrilo, dicloruro de etileno, clorometano, anhídrido maleico, o-cresol o 2,6-xilenol; en lecho fluidizado rápido: síntesis de Fischer-Tropsch; en lecho fluidizado burbujeante de partículas gruesas: polietileno y polipropileno.

### **2.8.3 Craqueo de hidrocarburos.**

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, utilizando reacciones denominadas de craqueo presenta dos características particulares. Una de ellas es que las reacciones son endotérmicas. La segunda es que se produce una deposición de carbono en la superficie de los sólidos cercanos. Estas características, junto a las ingentes cantidades de material a tratar, determina el proceso industrial a utilizar. Básicamente estos procesos se llevan a cabo en dos módulos, un primer módulo diseñado para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbono, y un segundo, donde el carbono depositado se quema, recuperándose así el calor, y

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

devolviéndose este al primer módulo, mediante las propias partículas en recirculación. Este calor se emplea para llevar a cabo la reacción en el primer módulo. Este proceso se desarrolla usando un sistema de recirculación compuesto por uno o más lechos fluidizados.

### **2.8.3.1 Craqueo catalítico fluido.**

En contacto con el catalizador adecuado, los hidrocarburos pesados en fase vapor se dividen en elementos de menor peso molecular. Son muchos los factores involucrados, pero siendo clave el modo en el que se suministra la gran cantidad de calor que se necesita para la reacción endotérmica y la forma de regenerar las partículas catalizadoras con efectividad y rapidez. El método de craqueo catalítico fluido ( FCC, del inglés Fluid Catalytic Cracking) lleva a cabo los puntos anteriores con sencillez, de modo que realiza simultáneamente los dos procesos fundamentales expuestos anteriormente.

### **2.8.3.2 Craqueo térmico.**

El proceso denominado craqueo térmico se lleva a cabo también utilizando lechos fluidizados, siendo su uso más común el de producción de etileno y propileno a partir de fragmentación de nafta procedente del petróleo, mediante reacciones altamente endotérmicas. Etileno y propileno sirven como elementos de partida en síntesis orgánicas y polimerizaciones.

A pesar de haberse desarrollado procesos con sistemas de un solo lecho fluidizado, son los sistemas de dos lechos con recirculación de partículas los que suponen una operación de mayor éxito.

### **2.8.4 Combustión.**

#### **2.8.4.1 Combustión de carbón.**

Debido a la necesidad de encontrar un proceso para combustionar carbón de mala calidad o combustibles que no se pueden quemar en una caldera convencional de manera eficiente. Comenzó a desarrollarse la combustión en lecho fluidizado, que acaparó la atención y esfuerzos de varias potencias tecnológicas con los crisis del petróleo de 1970s.

Un diseño típico es el basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En éste, se fluidiza en primer lugar de caliza o dolomita mediante aire, y posteriormente, se van inyectando partículas pequeñas de carbón (de 3 a 6 mm). Debido a las elevadas velocidades de gas con las que operan estas unidades, se produce una pérdida considerable de partículas. Estas partículas que contienen carbono sin quemar, bien se atrapan y se queman en celdas especialmente diseñadas para ello, o bien se atrapan y reconducen al lecho por medio de ciclones.

#### **2.8.4.2 Incineración de residuos sólidos.**

La incineración de residuos sólidos urbanos es algo inevitable en áreas pobladas. Normalmente son utilizados para este fin quemadores de parrilla, siendo estos eficientes térmicamente, aunque en ocasiones presentan problemas debido a la emisión de fuertes olores. Estos problemas pueden ser evitados con incineradores de lecho fluidizado, que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y de alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos.

En el proceso los residuos son triturados, retirándose los elementos metálicos, y se fluidiza el resultado en el interior del incinerador. La temperatura de operación oscila entre 800°C y 900°C, con lo que los elementos orgánicos se descomponen y queman. El calor sobrante se evacua del lecho mediante un

## CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

circuito de agua, de esta manera aprovechando la energía excedente. Los sólidos se queman completamente y la ceniza es eliminada por la parte inferior del lecho.

Para mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas hay que pre tratar convenientemente los residuos, con el fin de eliminar los materiales inorgánicos. En adicción, como en todas las unidades, es necesario garantizar la calidad de las emisiones mediante el uso de filtros y analizadores.

### **2.8.5 Gasificación.**

#### **2.8.5.1 Gasificación de carbón.**

La gasificación de carbón fue una de las aplicaciones con importancia de los lechos fluidizados en ámbito comercial. Este proceso ha sido frecuentemente utilizado para la obtención de gas combustible aunque, en ocasiones, se ha visto desplazado por la efectividad de otros combustibles como el petróleo o el gas natural.

La gasificación es un proceso en el que se quema la materia sólida, carbón en este caso, con aporte mínimo de oxígeno. El objetivo es eliminar partículas y otras impurezas del combustible sólido, convirtiéndolo en gas, para poder utilizarlo en sistemas de combustión exigentes en lo que a calidad del combustible se refiere. El producto sólido obtenido (char) está formado por cenizas y residuos carbonosos. La gasificación se puede llevar a cabo a través de diferentes agentes, como aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno, y de ellos dependerá el contenido energético del gas obtenido.

### **2.8.5.2 Gasificación de residuos sólidos.**

Los residuos urbanos frecuentemente contienen materiales tóxicos y peligrosos. Por esta razón, en las plantas de incineración ordinarias es necesario implantar equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias medioambientales vigentes. No obstante, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta mucho más simple y económica debido a que el volumen de gas producido es menor que en los incineradores, resultando las plantas de gasificación ventajosas en el tratamiento de residuos tóxicos.

### **2.8.6 Activación de carbón.**

El carbón activado se utiliza para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la separación de sustancias orgánicas, en recuperación de solventes, y como catalizador, en diversas reacciones químicas. En el proceso de activación del carbón, materia prima que se emplea es el carbón, madera u otros residuos vegetales (como cascara de coco o cacahuete). La activación se divide en dos fases. Estas son la carbonización de los sólidos precursores y la activación o gasificación del carbonizado, que tiene lugar a una temperatura de 800°C – 1000°C. En la carbonización se eliminan elementos como  $H_2$  y  $O_2$  de los precursores, para formar un esqueleto carbonoso. Durante la gasificación el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o alguna combinación de estos) de manera que se eliminan los átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica.

Los lechos fluidizados suelen ser unidades multietapa, que proporcionan una distribución del tiempo de residencia más uniforme de los sólidos y ayudan a recuperar calor para la gasificación mediante la combustión posterior del CO y  $H_2$  procedente de la carbonización.

### 2.8.7 Calcinación.

Las partículas de caliza y dolomita se pueden calcinar de forma sencilla en un lecho fluidizado quemando directamente combustible en el lecho. La reacción es altamente endotérmica por lo que supone un elevado derroche de combustible. Para recuperarse gran parte del calor se suelen emplear sistemas multietapa, donde el material bruto es introducido por la etapa superior y va cayendo de etapa en etapa. En la etapa de calcinación, que es una de las inferiores, se inyecta combustible que se mezcla con el aire de fluidización quemando las partículas de material. El calor residual sirve para aumentar la temperatura de las partículas de las fases superiores y los restos calcinados abandonan el lecho por la parte inferior.

### **Referencias bibliográficas capítulo 2**

- [1] Apartados 2.1, 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.8
- [6] Apartado 2.5
- [9] Apartado 2.5

### 3 MÉTODO TEÓRICO

Como se ha mencionado anteriormente, para la realización de las simulaciones del lecho fluidizado se va a utilizar el programa basado en los volúmenes finitos, FLUENT 12.1.2 CFD software. Este programa basa su cálculo en un modelo euleriano multifásico, que considera la conservación de la masa y el momento para las fases de gas y fluido. La teoría cinética de flujo granular, que considera la conservación de la fluctuación de energía de los sólidos, sirve como ecuación de cierre que gobierna las tensiones de los sólidos. Las ecuaciones que utiliza el programa se enuncian a continuación:

Ecuaciones diferenciales de conservación de la masa para la fase gas (g) y para la fase sólido (s):

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g) + \nabla (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s) + \nabla (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

Ecuaciones diferenciales de cantidad de movimiento para la fase gas y para la fase sólido:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g) + \nabla (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g^2) = \\ -\alpha_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g + \alpha_g \cdot \rho_g \cdot \vec{g} - K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s) + \nabla (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{v}_s^2) = \\ -\alpha_s \cdot \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \vec{g} + K_{gs} \cdot (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (3.4)$$

## MÉTODO TEÓRICO

Ecuación de la conservación de la fluctuación de la energía de las partículas sólidas:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \vec{v}_s \cdot \Theta_s) \right] = \\ & = \left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \cdot v_s + \nabla (k_{\Theta_s} \cdot \nabla \cdot \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} - 3K_{gs} \Theta_s \end{aligned} \quad (3.5)$$

Para la completa definición de las anteriores ecuaciones es necesario definir ciertos coeficientes de intercambio de cantidad de momento, éstos, particulares de un modelo concreto, como son el modelo de Gidaspow y el modelo de Syamlal–O'brien, utilizados en la simulación. Estos coeficientes de intercambio de momento pueden ser calculados mediante funciones de arrastre específicas. En este estudio serán aplicadas las funciones de arrastre de Gidaspow y Syamlal–O'brien, como ya se ha mencionado y como se podrá observar en lo subsiguiente. Así como las funciones de arrastre como las ecuaciones constitutivas, deberán ser seleccionadas según los criterios del usuario del programa FLUENT 12.1.2 CFD software, y como se explicara más adelante en el apartado [5].

Función de arrastre (drag) de Gidaspow:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot C_D \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \cdot \alpha_g^{-2.65} \quad \text{para } \alpha_g > 0.8 \quad (3.5)$$

$$K_{gs} = 150 \cdot \frac{\alpha_s^2 \cdot \mu_g}{\alpha_s \cdot d_s^2} + 1.75 \cdot \frac{\alpha_s \cdot \rho_g \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad \text{para } \alpha_g \leq 0.8 \quad (3.6)$$



## MÉTODO TEÓRICO

donde

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g \cdot Re_s} \cdot \left[ 1 + 0.15 \cdot (\alpha_g \cdot Re_s)^{0.687} \right] \quad (3.7)$$

con

$$Re_s = \frac{\rho_g \cdot d_g \cdot |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g}$$

Función de arrastre (drag) de Syamlal–O’Brien:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g}{v_{r,s}^2 \cdot d_s} \cdot C_D \cdot \left( \frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) \cdot |v_s - v_g| \quad (3.8)$$

donde

$$C_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (3.9)$$

y

$$v_{r,s} = 0.5 \cdot \left( A - 0.06 \cdot Re_s + \sqrt{(0.06 \cdot Re_s)^2 + 0.12 \cdot Re_s \cdot (2 \cdot B - A) + A^2} \right)$$

## MÉTODO TEÓRICO

con

$$A = \alpha_g^{4.14}, \quad B = 0.8\alpha_g^{1.28} \quad \text{para} \quad \alpha_g \leq 0.85$$

o

$$A = \alpha_g^{4.14}, \quad B = \alpha_g^{2.65} \quad \text{para} \quad \alpha_g > 0.85$$

Las ecuaciones constitutivas son requeridas para cerrar las relaciones de gobierno, y son las que siguen a continuación.

Presión de los sólidos:

$$p_s = \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \Theta_s + 2\rho_s (1+e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (3.10)$$

Función de distribución radial:

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.11)$$

## MÉTODO TEÓRICO

Tensor de tensiones de la fase sólida:

$$\tilde{\tau}_s = \alpha_s \mu_s \left( \nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T \right) + \alpha_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{\bar{I}} \quad (3.12)$$

Viscosidad tangencial de los sólidos:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.13)$$

Viscosidad de colisión de los sólidos:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left( \frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.14)$$

Viscosidad de fricción de los sólidos:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \cdot \sin \phi}{2 \cdot \sqrt{I_{2D}}} \quad (3.15)$$

donde  $\phi$  es el ángulo de fricción interna y  $I_{2D}$  es la segunda invariante de la desviadora del tensor de tensiones.

## MÉTODO TEÓRICO

Viscosidad cinética (Gidaspow):

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{96 \cdot \alpha_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} \cdot g_{0,ss} \cdot \alpha_s \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (3.16)$$

Viscosidad cinética (Syamlal–O'brien):

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{6(3 - e_{ss})} \cdot \left[ 1 + \frac{2}{5} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot (3e_{ss} - 1) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right] \quad (3.17)$$

Coeficiente de difusión de temperatura granular (Gidaspow):

$$k_{\Theta_s} = \frac{150 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{384 \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{6}{5} \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \alpha_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}} \quad (3.18)$$

Coeficiente de difusión de temperatura granular (Syamlal–O'brien):

$$k_{\Theta_s} = \frac{15 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{4 \cdot (41 - 33 \cdot \eta)} \left[ 1 + \frac{12}{5} \cdot \eta^2 \cdot (4 \cdot \eta - 3) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} + \frac{16}{15 \cdot \pi} (41 - 33 \cdot \eta) \cdot \eta \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right] \quad (3.19)$$

## MÉTODO TEÓRICO

con

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot (1 + e_{ss})$$

Energía de disipación de colisiones:

$$\gamma_{\Theta_s} = \frac{12 \cdot (1 - e_{ss}^2) \cdot g_{0,ss}}{d_s \cdot \sqrt{\pi} \cdot \rho_s \cdot \alpha_s^2 \cdot \Theta_s^{3/2}} \quad (3.20)$$

### **Referencias bibliográficas Capítulo 3**

- [3] Apartado 3
- [5] Apartado 3
- [7] Apartado 3, Apéndice 3
- [8] Apartado 3

### 4 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

#### 4.1 Características geométricas.

El lecho que se pretende simular, se asemeja, geométricamente al del artículo de Y. T. Makkawi et al., 2002 [2], pero en un caso 2D, siendo el del artículo un caso experimental llevado a cabo en un tanque de sección circular. La altura del lecho fijo, así como la anchura, coinciden. La altura del depósito, se ha adecuado al mallado y a las características del problema, no siendo ésta tan elevada como en el caso experimental.

En el caso experimental en el que se basa el proyecto, se ha utilizado el método de tomografía por capacitancia eléctrica, de manera que mediante electrodos, se capta la fracción de volumen a lo largo de dos superficies a distintas alturas, contando estas con ocho electrodos cada una. Para llevar a cabo esto a la hora de simular computacionalmente, se ha calculado la fracción de volumen a dos alturas muy similares a las del estudio experimental, pero al ser el caso computacional 2D, se ha calculado la fracción de volumen a lo largo de una línea horizontal, en vez de una superficie. El hecho de que estas alturas no sean exactamente las mismas que las del caso experimental se debe a la naturaleza de la malla y la necesidad de que estas líneas coincidan con los nodos de la malla.

También se tomaran medidas de presión estática en la base del lecho. Se calcularán del mismo modo que la fracción de volumen, a lo largo de una línea horizontal situada una celda (del mallado) por encima de la base del depósito.

Tanto para el cálculo de la fracción de volumen en las dos alturas, como para el cálculo de la presión en la base del lecho, se han realizado promedios a lo largo de las tres líneas definidas.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se puede observar la figura acotada que representa el lecho a simular, así como las líneas utilizadas para la obtención de datos o la naturaleza de los elementos que lo componen.

## DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

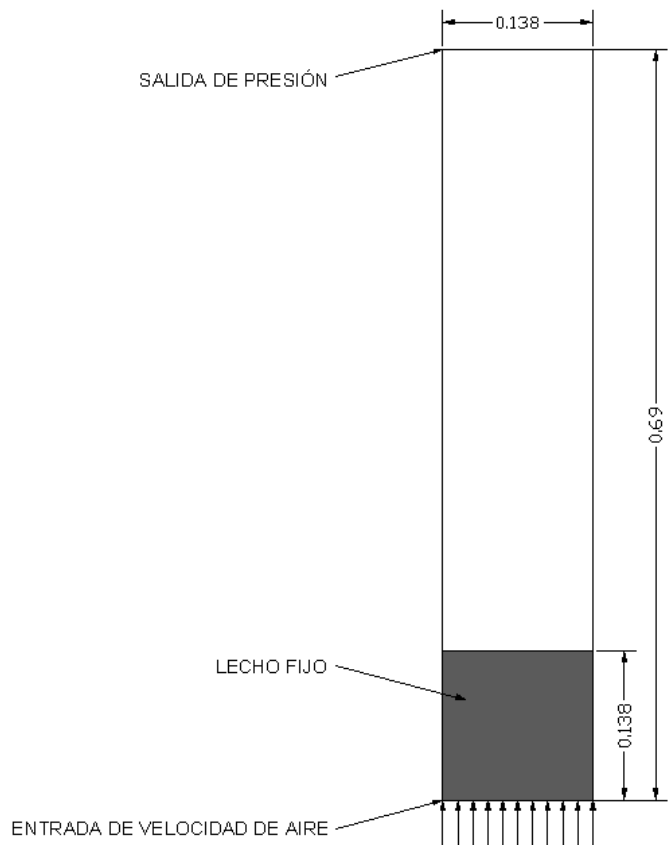


Figura 4.1. Esquema acotado del lecho.

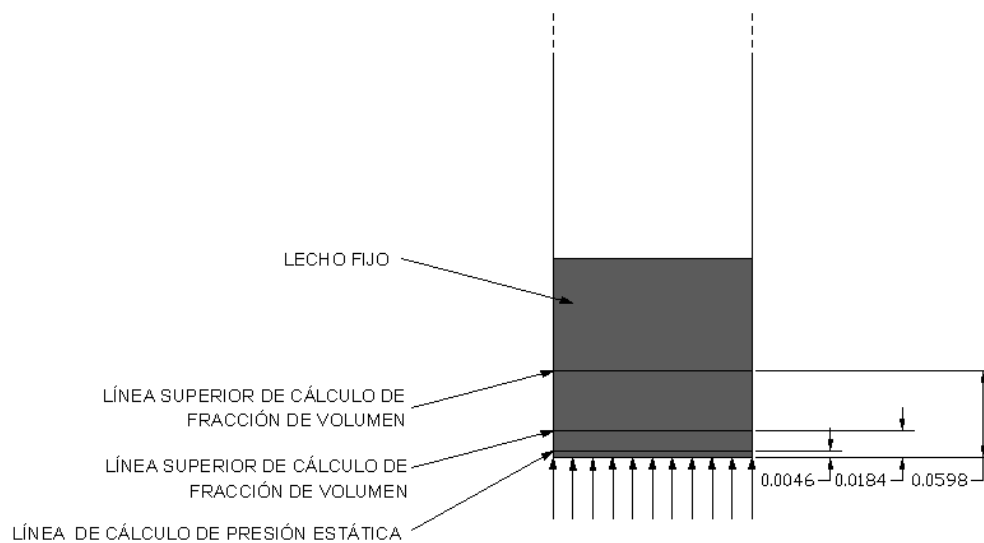


Figura 4.2. Esquema acotado de las líneas de cálculo del lecho.

## DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Descripción	Valor
Anchura del lecho	0.138 m
Altura del deposito	0.69 m
Altura del lecho fijo	0.138 m
Cota de la línea de cálculo de presión	0.0046 m
Cota de la línea inferior de cálculo de volumen de solido	0.0184 m
Cota de la línea superior de cálculo de volumen de solido	0.0598 m
Tamaño de celda del mallado	(0.0046 x 0.0046) m

Tabla 4.1. Tabla resumen valores geométricos.

### 4.2 Características del lecho.

En este punto pasaremos a definir las características propias del lecho. Como se puede apreciar en la Figura 4.1, las condiciones de contorno de entrada y salida se encuentran en la parte inferior y superior del lecho, respectivamente. Se caracterizará la entrada por la velocidad superficial del fluido, en nuestro caso, aire. En cuanto a la salida, se considera una salida de presión.

Como se acaba de comentar el fluido de trabajo será aire, a temperatura y presión atmosférica, es decir, en condiciones estándar. El rango de velocidad superficial en la entrada de aire será  $(0.4 - 1.3) \text{ m/s}$  ó  $\approx (1 - 3.25) \cdot U_{mf} \text{ m/s}$ .



## DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Las partículas constituyentes de nuestro lecho a simular serán partículas esféricas de vidrio (glass) de densidad  $2600 \text{ kg/m}^3$ . El diámetro de las partículas será de  $0.53 \text{ mm}$ . Se puede afirmar, pues, que se trata de un tipo de partículas perteneciente al grupo B de la clasificación de Geldart.

En cuanto al coeficiente de restitución se ha elegido un coeficiente de  $0.9$ . Es el más comúnmente seleccionado en simulaciones de este tipo, aunque su valor puede variar dentro del intervalo  $0.85 - 0.99$ .

El valor de empaquetamiento inicial, es la relación de fracción de volumen que tiene la fase partícula respecto a la fase gas (aire) cuando el lecho se encuentra inmóvil, es decir, cuando observamos el lecho fijo. Este valor será de  $0.6$  para partículas esféricas.

Descripción	Valor
Condición de contorno de entrada	Entrada de velocidad
Condición de contorno de salida	Salida de presión
Densidad del gas	$1.225 \text{ kg/m}^3$
Velocidad superficial del aire	$(0.4 - 1.3) \text{ m/s}$ , $(1 - 3.25) \cdot U_{mf} \text{ m/s}$
Densidad de partícula	$2600 \text{ kg/m}^3$
Diámetro medio de partícula	$0.53 \text{ mm}$
Coeficiente de restitución	$0.9$
Empaquetamiento uncial de sólidos	$0.6$

Tabla 4.2. Tabla resumen de las características propias del lecho.

### 4.3 Características computacionales.

Por ultimo habrá que determinar las características computacionales de la simulación que se pretende llevar a cabo. Estas características son las relacionadas con el proceso computacional iterativo que utiliza FLUENT 12.1.2 CFD software y con la extracción de datos.

Para empezar, habrá que decidir el tiempo de simulación que se desea realizar para poder obtener los suficientes datos. Los primeros 2.5 s sirven para asegurarse que el lecho este completamente fluidizado (pre-simulación). Después de esto se simulara cada caso una cantidad de tiempo de 10 s, siendo aquí donde se extraerán los datos. Por lo tanto cada caso se simulara por un total de 12.5 s.

También se debe determinar el intervalo de tiempo con el que se van resolviendo las ecuaciones transitorias, así como el número máximo de iteraciones por cada paso de tiempo. En este caso se ha elegido un paso de tiempo de  $10^{-4}$  s. De tal manera, para llevar a cabo la pre-simulación necesitaremos un total de 25000 pasos de tiempo, y para llevar a cabo la simulación otros 100000 pasos de tiempo. El número máximo de iteraciones que realiza el programa por cada paso de tiempo es de 100 iteraciones, pero también habrá que fijar un criterio de convergencia. El criterio de convergencia será fijado en un valor de  $10^{-3}$ , para la ecuación de continuidad, así como para el cálculo de las velocidades de la fase fluida y la fase partícula, y la fracción de volumen de la fase partícula. De este modo, si los residuos (error) descienden a este valor, el programa empezará a iterar el siguiente paso de tiempo, si no, empezará a calcular el siguiente paso de tiempo cuando llegue al número máximo de iteraciones por paso de tiempo, es decir, 100 iteraciones. Esto no ocurre ya que los casos convergen en el valor de criterio de convergencia al llegar aproximadamente a las 80 iteraciones.

De este modo queda determinado el proceso computacional iterativo, definiendo todos sus parámetros para asegurar una simulación óptima.

Cabe destacar que las simulaciones se realizarán en un ordenador Intel® Core™ 2Quad CPU, Q9400 @ 2.66Ghz, con 3.25GB memoria RAM.

Cada simulación completa, es decir pre-simulación y simulación, 12.5 s de simulación, se lleva a cabo en un rango de tres a cuatro días.

## DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Descripción	Valor
Tamaño del paso de tiempo	0.0001 s
Tiempo de pre-simulación	2.5 s
Tiempo de simulación	10 s
Criterio de convergencia	0.001
Número máximo de iteraciones por paso de tiempo	100

Tabla 4.3. Tabla resumen de las características del proceso computacional iterativo.

### **Referencias bibliográficas Capítulo 4**

[2] Apartado 4, 5

[11]

### 5. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Como anteriormente se ha mencionado, para la realización de las simulaciones del lecho fluidizado, se va a utilizar el programa FLUENT 12.1.2 CFD software. Este programa basa sus cálculos en el método de los elementos finitos. Este tipo de programas suele constar de tres módulos principales, siendo éstos, como pasos indispensables para la realización de la simulación, y teniendo el usuario que pasar por cada uno de ellos. El primer módulo se denomina pre-proceso, y en él se define la geometría del problema, dentro de ésta se establecerá la malla de elementos y se definirán los materiales. Cabe señalar que la malla puede hacerse automáticamente o manualmente dependiendo de las consideraciones y necesidades del problema a simular. El segundo módulo denominado proceso, donde se aplicarán las cargas, velocidades y en general variables externas que requiera nuestro problema y donde se implementará la solución del problema. El tercero y último se conoce como post-proceso, en el podremos obtener una visualización o listado de los resultados.

Esto es un concepto general y que suele darse de una forma u otra en la mayoría de programas que basan su cálculo en el método de los elementos finitos.

En nuestro caso concreto, estas partes no quedan definidas tal cual, como puede ocurrir en programas de cálculo estructural como ANSYS, del cual deriva el programa que utilizaremos. Las partes son las mismas, pero la distribución de estas, cuenta con algunas particularidades. Se explicará de acuerdo con la distribución de partes, o bloques a configurar, que se sigue en FLUENT 12.1.2 CFD software.

En lo subsiguiente, se explicará con detalle el proceso de configuración que se ha llevado a cabo para poder completar una simulación de un modelo multifásico euleriano.

#### 5.1 Preproceso.

Como se ha mencionado anteriormente, el preproceso es la parte en la que tendrá que quedar definida la geometría del problema a través de la malla y los

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

elementos constitutivos de esta, como en nuestro caso son, entradas de aire, salidas de presión, paredes, etc....

Esta parte ha sido realizada externamente al programa de simulación de fluidos FLUENT 12.1.2 CFD software, con un programa alternativo de creación de geometrías y mallado denominado GAMBIT 2.4.6. A continuación se mostrará una imagen perteneciente al proceso de elaboración de la malla. Esta malla está diseñada en 2D, y el proceso a seguir, aunque no se detalla, sí cabe mencionar la naturaleza del proceso que GAMBIT 2.4.6 requiere para confeccionar una malla. Se irán definiendo elementos cada vez de mayor complejidad, así, se empezará definiendo puntos, luego, con estos puntos se definirán líneas, y con estas líneas, a su vez, se podrán definir caras, a partir de las cuales se podrá mallar la geometría. Además GAMBIT 2.4.6 permite definir las condiciones de contorno: “velocity inlet”, “pressure outlet”, etc. En la Figura 5.1 se puede observar la geometría de la malla.

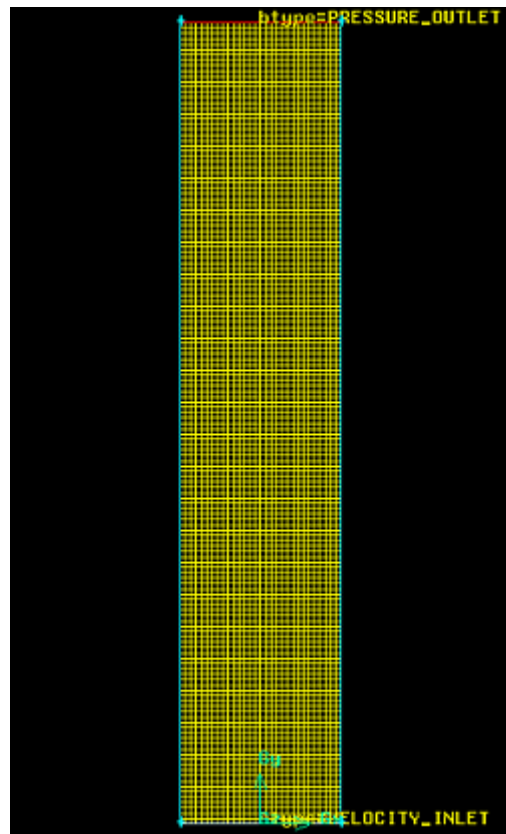


Figura 5.1. Geometría mallada (GAMBIT).

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

### 5.2 Configuración del problema (Problem Setup). Proceso.

Esta parte engloba casi por completo la parte de proceso, definida anteriormente, y en ella se deberán configurar diferentes aspectos de nuestra simulación concreta. Dentro de la configuración aparece una subdivisión de pasos que se deberán seguir y quedan definidos en lo que sigue. A continuación se muestra en la figura general de la pantalla de trabajo de FLUENT 12.1.2 CFD software.

Se puede observar que en la parte de la izquierda aparecen desglosadas las partes, o pasos, e inmediatamente a la derecha aparece el menú de configuración que corresponde a la parte que esta seleccionada.

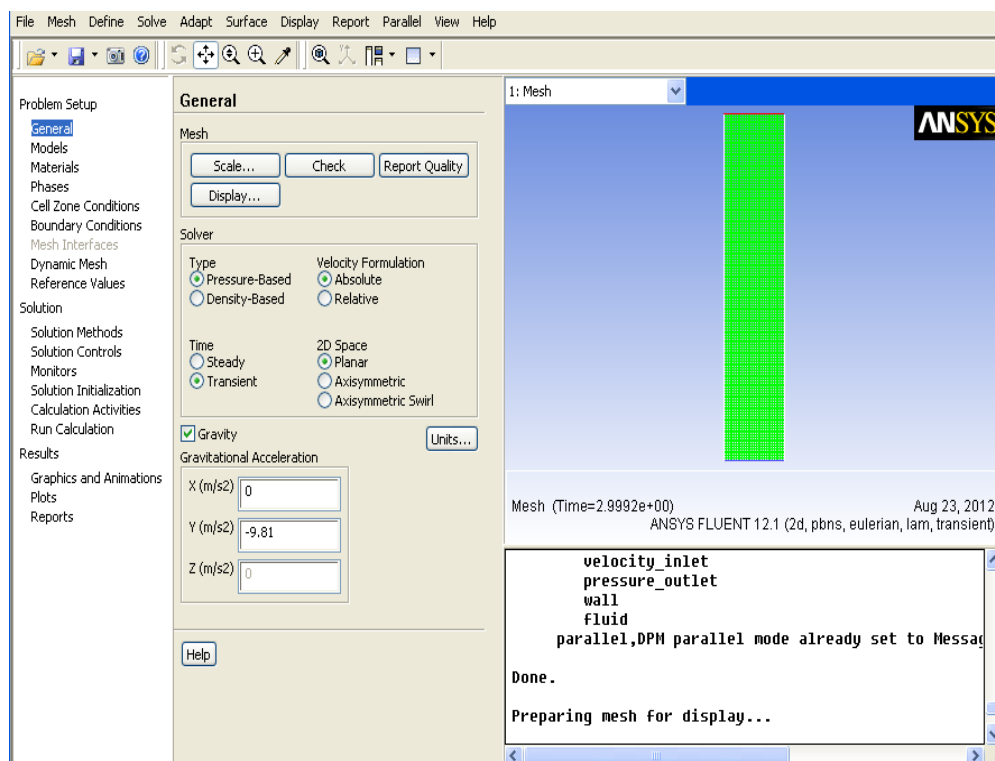


Figura 5.2. Interfaz de FLUENT 12.1.2 CFD software.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

### 5.2.1 General (General).

En esta parte se configuraran parámetros generales como la naturaleza estacionaria o transitoria de nuestro problema, si el cálculo está basado en la presión o en el volumen, si nos interesa que nuestro problema se resuelva teniendo en cuenta algún tipo de simetría, si las velocidades serán relativas o absolutas o el efecto de la gravedad.

También aparecerán una serie de opciones relativas a la malla, para escalarla o hacer que aparezca visualmente, pero la más interesante será “Check”, que nos será útil a la hora de verificar que nuestra malla está bien construida y no tiene defectos.

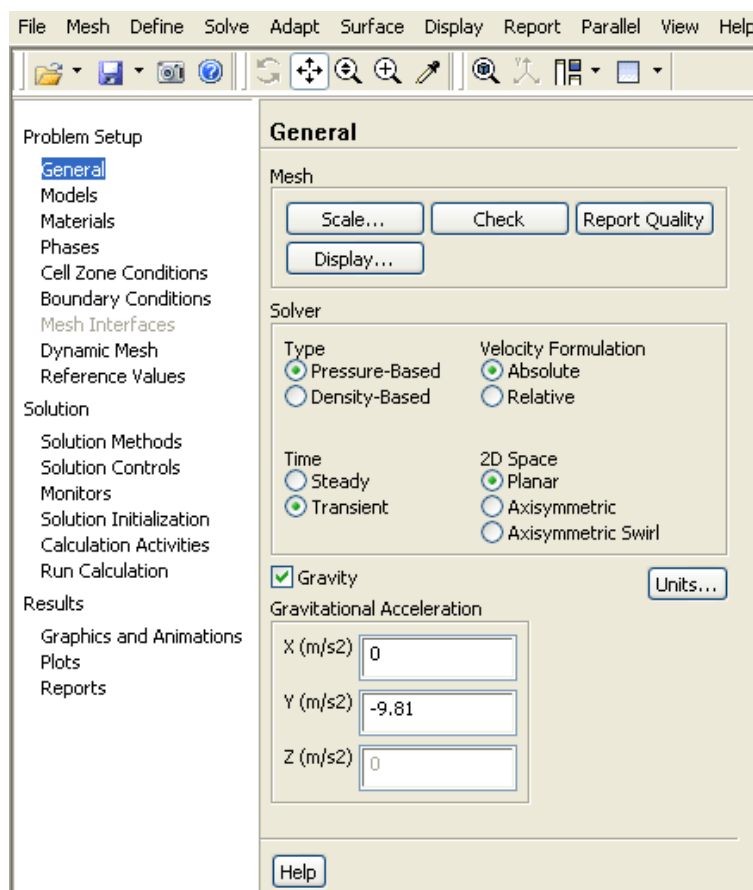


Figura 5.3. Menú de configuración “General”.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Cabe señalar que nuestro problema será de naturaleza transitoria, y que la gravedad será introducida con signo negativo debido a nuestro sistema de coordenadas.

### 5.2.2 Modelos (Models).

Aquí se seleccionan los modelos de cálculo que se desean que el programa utilice, a medida que elijamos más, porque nuestro problema requiera calcular mayor número de parámetros, o este orientado a definir mayor número de aspectos, puede que sea necesario activar más modelos, lo cual, también ralentizará el cálculo.

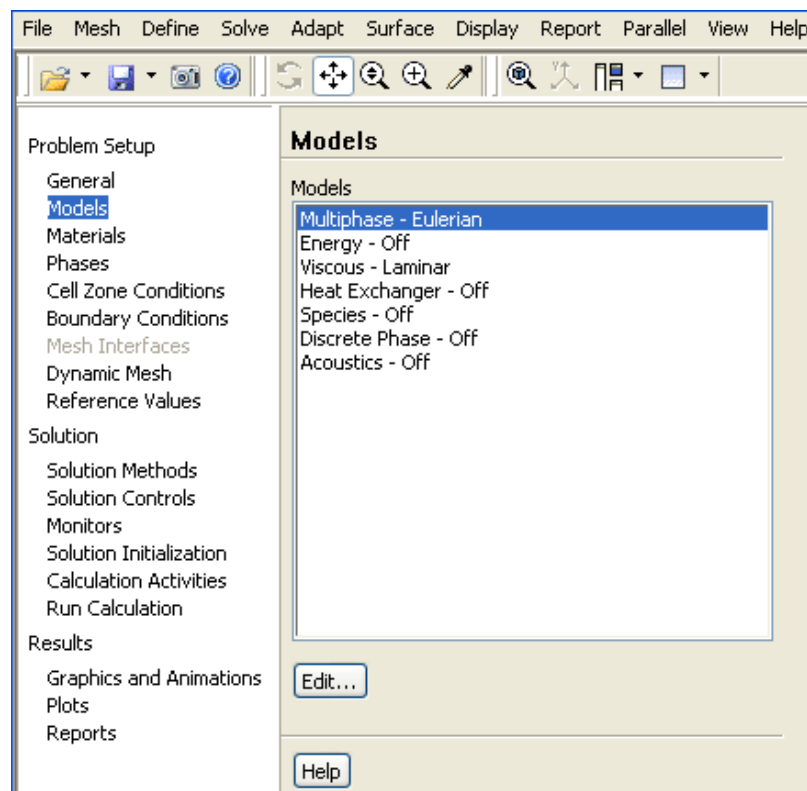


Figura 5.4. Menú de configuración “Models”.



## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Lo único que habrá que configurar aquí será la opción multifase (multiphase), haciendo doble clic en la opción, haciendo aparecer otra subventana como muestra la Figura 5.5.

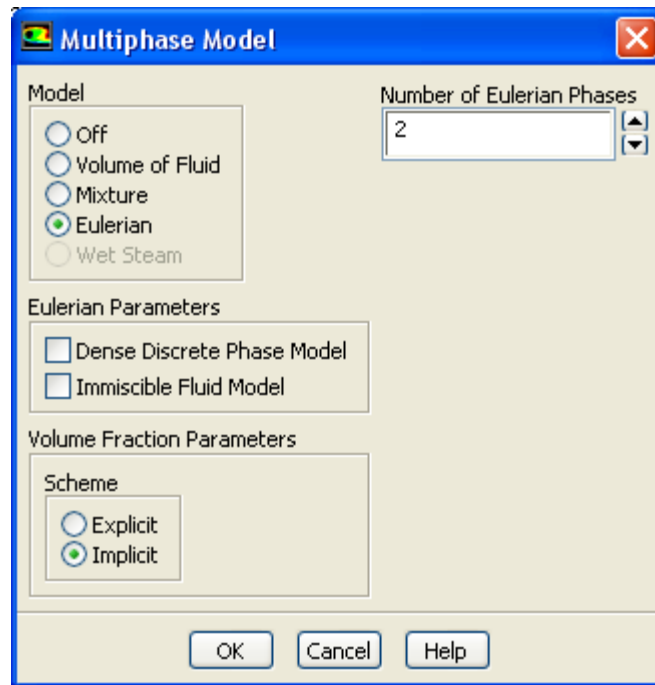


Figura 5.5. Menú de configuración “Multiphase Model”.

Se hará doble clic también sobre Viscoso (Viscous), abriéndose otra subventana, donde sólo se tendrá que seleccionar Laminar. Esta elección está basada en que las velocidades a las cuales se va a trabajar presentan un régimen laminar alrededor de una esfera (partícula).

Esta parte quedara configurada así, ya que no nos interesa utilizar ecuación de la energía, ya que no se tratara en ninguna parte del estudio transferencia de calor.

### 5.2.3 Materiales (Materials).

En esta parte se definirán los materiales que entraran en juego en nuestra simulación, en este caso, aire en condiciones ambientales y partículas de vidrio. La única particularidad será que habrá que definirlos dentro de fluidos (fluids), ya que se cuando el lecho se encuentra fluidizado, la fase partícula se comportará como tal. La ventana de Materiales se muestra a continuación en la Figura 5.6. Cabe señalar que FLUENT cuenta con una base de datos de materiales, y elementos como el aire, se pueden encontrar en ésta. Para crear un material, habrá que hacer clic en Create/Edit..., y configurarlo como se desee.

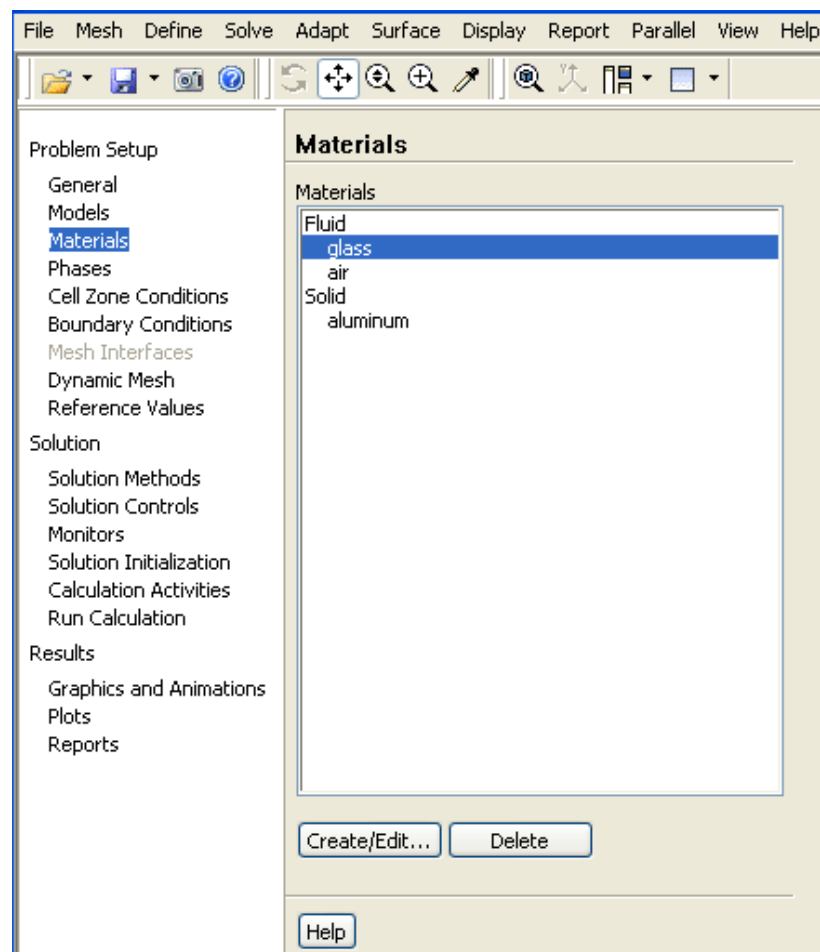


Figura 5.6. Menú de configuración “Materials”.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Debajo de Sólido (Solid) aparece aluminio (aluminum), porque es el material que por defecto crea GAMBIT para definir las paredes, pero es indiferente ya no entra en juego, al considerarse éste adiabático, es decir, que no se transfiere calor a través de él.

Una vez definidos los materiales, pasaremos al siguiente módulo.

### 5.2.4 Fases (Phases).

En esta parte o módulo, nos encargaremos de definir las dos diferentes fases que componen la simulación, la fase aire (air) o fase primaria, y la fase partícula (glass) o fase secundaria, así como la interacción entre ambas fases.

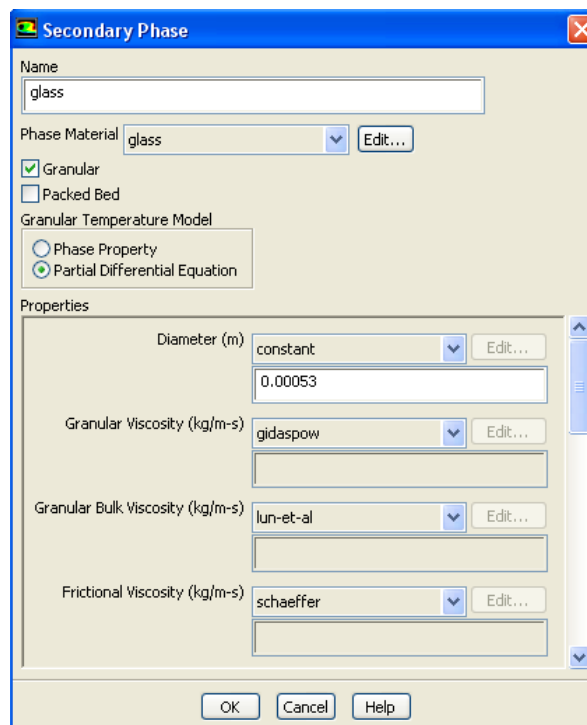


Figura 5.7. Menú de configuración “Secondary Phase”.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

La fase primaria, es decir, el aire, no necesita configuración, así que por defecto estará correctamente configurada. Se hará doble clic encima de la fase secundaria, o se seleccionará con un solo clic, y a continuación se hará clic sobre el botón “Edit...”. Aparecerá en la pantalla la ventana de configuración de la fase secundaria. Esta parte es fundamental, y su correcta configuración es vital a la hora de conseguir una buena simulación y prevenir posibles errores, ya que muchos de los errores son consecuencia de una mala configuración de la fase secundaria.

Como aparece en la Figura 5.7, se debe hacer clic y activar la opción Granular, ya que la fase secundaria está compuesta de pequeñas esferas de vidrio.

También seleccionaremos la opción de Ecuaciones Diferenciales Parciales (Partial Differential Equation), y en lo subsiguiente en la ventana habrá que seleccionar una serie de criterios para las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la fase secundaria, explicadas anteriormente, relacionadas con la viscosidad, y algunos de los parámetros que influyen en estas ecuaciones, así como definir ciertos parámetros, como el propio diámetro de las partículas, el factor de empaquetamiento máximo (Packing Limit), etc.

En las Tablas 5.1 y 5.2, se puede observar la configuración que se ha realizado de la fase secundaria, para un caso realizado bajo el modelo de Gidaspow.

Una vez terminada la configuración de las fases, se pasará a configurar la interacción entre éstas, de este modo, en el menú principal de fases (Phases), se deberá hacer clic en el botón de interacción (Interaction...). Como se puede apreciar en la Figura 5.8, dentro de la pestaña de arrastre (Drag), debemos marcar la opción que se corresponda con nuestro modelo, es este caso el modelo de Gidaspow o Syamlal-O'Brien.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

	Modelo de Gidaspow	Modelo de Syamlal-O'brien
Diameter (m)	constant = 0.00053	constant = 0.00053
Granular Viscosity (kg/m · s)	gidaspow	syamlal-obrien
Granular Bulk Viscosity (kg/m · s)	lun-et-al	lun-et-al
Frictional Viscosity (kg/m · s)	Schaeffer	Schaeffer
Angle Of Internal Friction (deg)	constant = 30.00007	constant = 30.00007
Frictional Pressure (pascal)	based-ktgf	based-ktgf
Frictional Modulus (pascal)	derived	Derived
Frictional Packing Limit	Constant = 0.61	Constant = 0.61

Tabla 5.1. Configuración de propiedades de la fase secundaria (Secondary Phase).

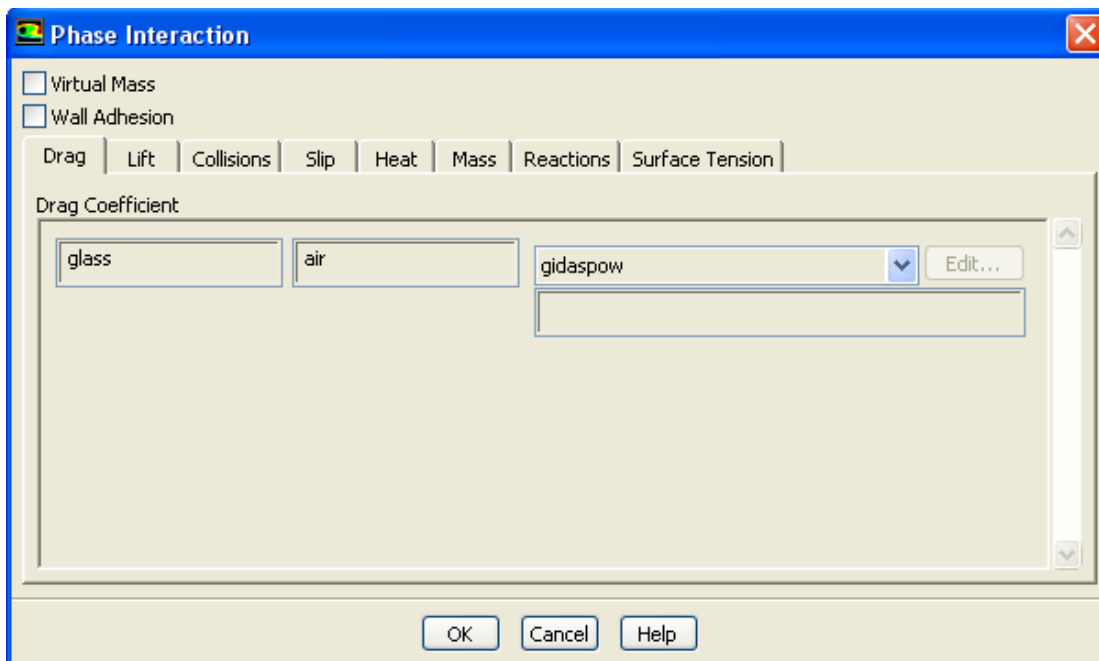
## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

	Modelo de Gidaspow	Modelo de Syamlal-O'Brien
Granular Conductivity (kg/m · s)	gidaspow	syamlal-obrien
Solids Pressure (pascal)	lun-et-al	lun-et-al
Radial Distribution	lun-et-al	lun-et-al
Elasticity modulus (pascal)	derived	derived
Packing Limit	constant = 0.63	constant = 0.63

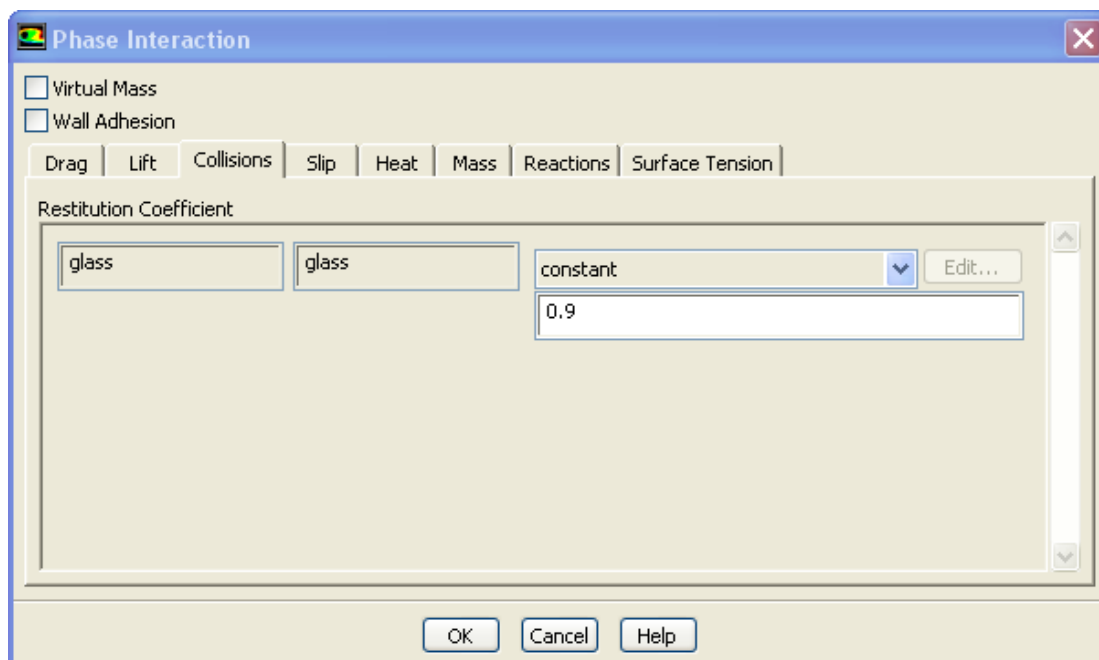
Tabla 5.2. Configuración de propiedades de la fase secundaria (Secondary Phase).  
(Continuación)

También habrá que modificar el coeficiente de restitución de las colisiones. Para ello se hace clic en la pestaña de colisiones (Collisions) y dentro de ésta se introducirá un valor de 0,9, como aparece en la Figura 5.9. Por lo general el valor de este coeficiente esta dentro del intervalo 0,9 – 0,99, pero se ha decidido darle el valor de 0,9 ya que es el valor típico en simulaciones de lechos fluidizados.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA



5.8. Menú de configuración “Phase Interaction” (Drag).



5.9. Menú de configuración “Phase Interaction” (Collisions).

### 5.2.5 Condiciones de contorno (Boundary Conditions).

Este módulo es el que se encarga de configurar los elementos físicos que componen nuestro problema, es este caso, está compuesto por el interior, una salida de presión (pressure\_outlet), una entrada de velocidad (velocity\_inlet) y las paredes del problema (wall).

En este modulo solo será necesario configurar la entrada de aire, y habrá que pasar por este menú cada vez que se desee cambiar la velocidad del fluido de entrada. Para ello se seleccionará esta opción con un clic, a continuación se seleccionará en la pestaña de fase (Phase) la fase primaria, en este caso aire (air). Así comunicamos al programa que queremos introducir la velocidad del aire que está entrando en el lecho por la parte inferior. Con estos parámetros seleccionados hacemos clic en editar (Edit...) y se abrirá una ventana cuya finalidad es definir la magnitud y el sentido de la velocidad de entrada, como se muestra en la Figura 5.10. En esta ventana se puede definir la velocidad de varias maneras, según convenga en cada tipo de problema. En este caso se ha configurado introduciendo magnitud y dirección.

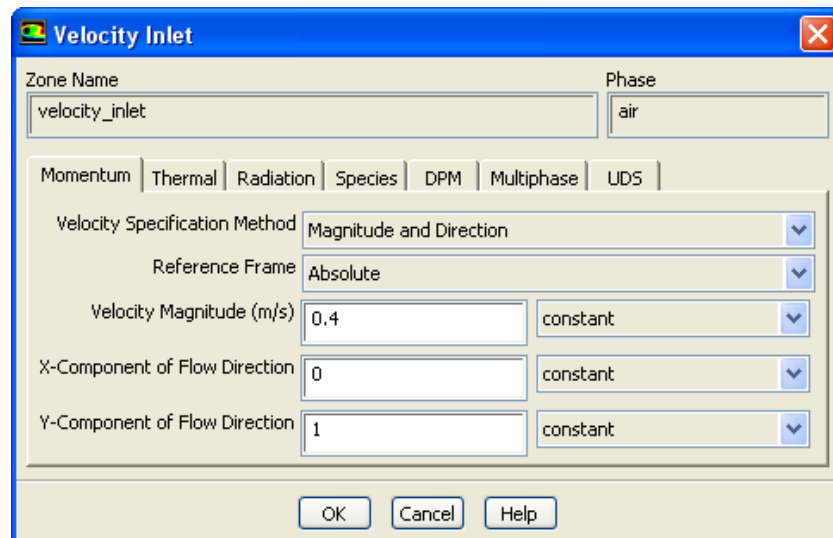


Figura 5.10. Menú de configuración "Velocity Inlet".



## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Con todo esto se hace clic en OK y se puede pasar al siguiente módulo.

### **5.2.6 Valores de referencia (Reference Values).**

En este modulo se pueden modificar ciertos valores de referencia que utiliza el programa. Estos se han dejado por defecto, siendo validos de este modo para la simulación.

### **5.2.7 Consideraciones (“Cell Zone Conditions” y “Dynamic Mesh”).**

No se ha hecho mención específica a estos dos módulos, pero sí que es necesario aclarar ciertos aspectos sobre ellos.

En primer lugar está condiciones de la zona de celda (Cell Zone Conditions). Aquí se pueden configurar ciertos aspectos de la zona interior de nuestro problema. Según el problema que se esté realizando, al elaborar la malla se pueden definir distintas partes del interior con distintas características. Para configurar qué parte del interior es lecho fijo y que parte es solo fluido, se pueden utilizar dos métodos. Uno de ellos es este método, se definen dos zonas interiores al elaborar la malla y se le indica al programa cuál de ellas es lecho fijo y cual es simplemente fluido. Otra de ellas, y además la utilizada en este caso es la definición de un solo interior al que se modificara desde dentro de FLUENT para que quede definido que parte del interior es lecho fijo y que parte es fluido. Se considera más óptimo el método explicado en lo subsiguiente ya que nos permite disponer de mayor flexibilidad y cambiar por ejemplo la altura del lecho fijo utilizando la misma malla. Digamos que ahorra trabajo en la parte de preproceso, y en muchos casos podremos utilizar una misma malla para simular lechos geométricamente diferentes.

En segundo lugar queda el modulo de malla dinámica (Dynamic Mesh), que se utilizará en casos en que la malla sufra movimiento, es decir, sufra aceleraciones ya bien porque modifique su velocidad o porque rote. En nuestro caso nuestra malla permanece estática, por lo que esta opción no se activará.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Con esto finaliza la configuración de la parte de Configuración del Problema.

### 5.3 Solución (Solution). Proceso.

Este bloque de configuración se encarga de gestionar, tanto algunos factores de relajación que se aplican a la resolución de las ecuaciones, o determinar las características del proceso iterativo. También podremos indicar al programa la clase de información que requerimos y la manera que nuestro problema requiere que esta sea.

#### 5.3.1 Métodos de solución (Solution Methods).

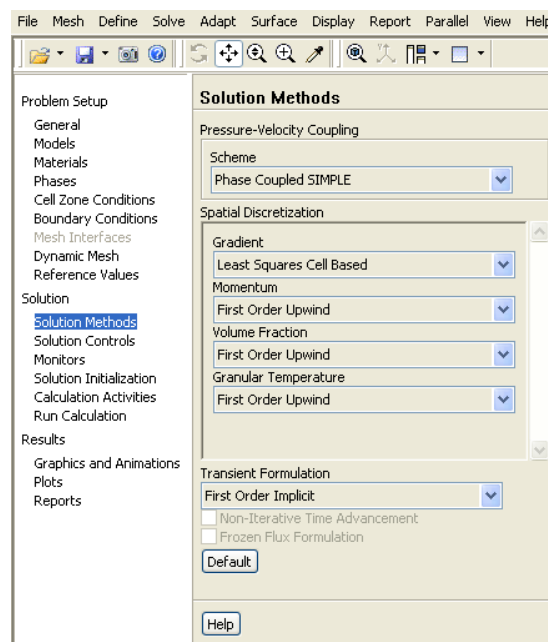


Figura 5.11. Menú de configuración “Solution Methods”

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Aquí se permite seleccionar el grado de precisión de las distintas ecuaciones que gobiernan la simulación. Como se puede apreciar en la Figura 5.11, el programa está configurado con ecuaciones de primer orden, debido a que el uso de ecuaciones de segundo orden, ralentizan en exceso el proceso iterativo de cálculo, para una mejora relativamente pequeña de la precisión.

### 5.3.2 Controles de la solución (Solution Controls).

Bloque de configuración únicamente dedicado a los factores de relajación para las distintas ecuaciones que resuelve el programa. Los coeficientes utilizados se reflejan en la Figura 5.12.

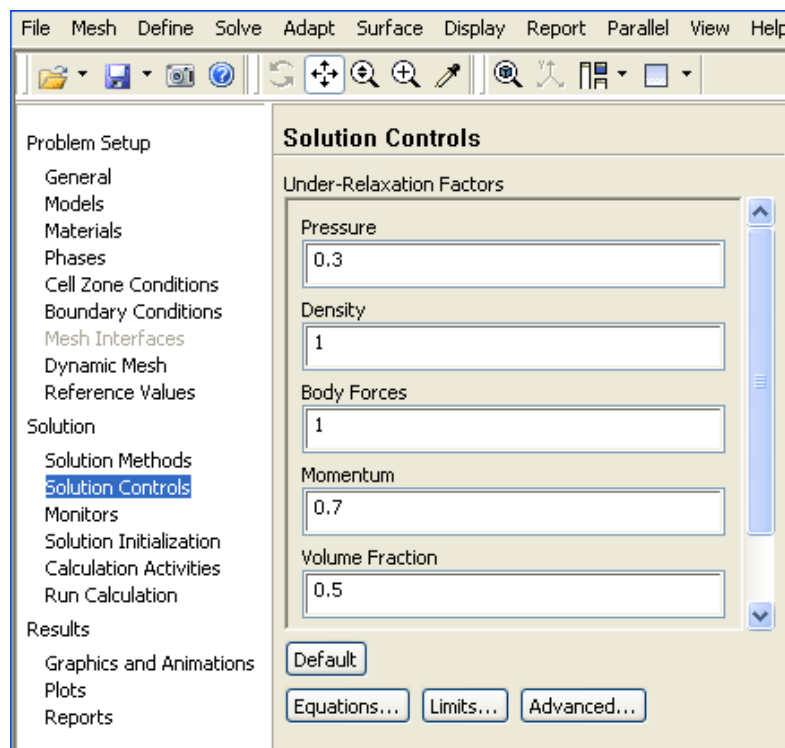


Figura 5.12. Menú de configuración "Solution Controls".

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

### 5.3.3 Monitores (Monitors).

En esta parte de la configuración podemos decidir qué datos deseamos visualizar del problema, y la forma de estos datos. En el caso concreto de este estudio, se desean obtener datos de presión en la base del lecho y fracción de volumen a lo largo de las dos líneas de la parte media-inferior del lecho fijo.

Para conseguir esto se deberá crear un “monitor” distinto para cada una de las magnitudes y para cada uno de los lugares geométricos donde se desee tomar esta magnitud, en este caso, serán líneas.

Primero se seleccionará “Residuals – Print, Plot” y se hará clic en “Edit...”, apareciendo la ventana que se muestra en la Figura 5.14. Aquí decidiremos el criterio de error por debajo del cual queremos que esté nuestro problema.

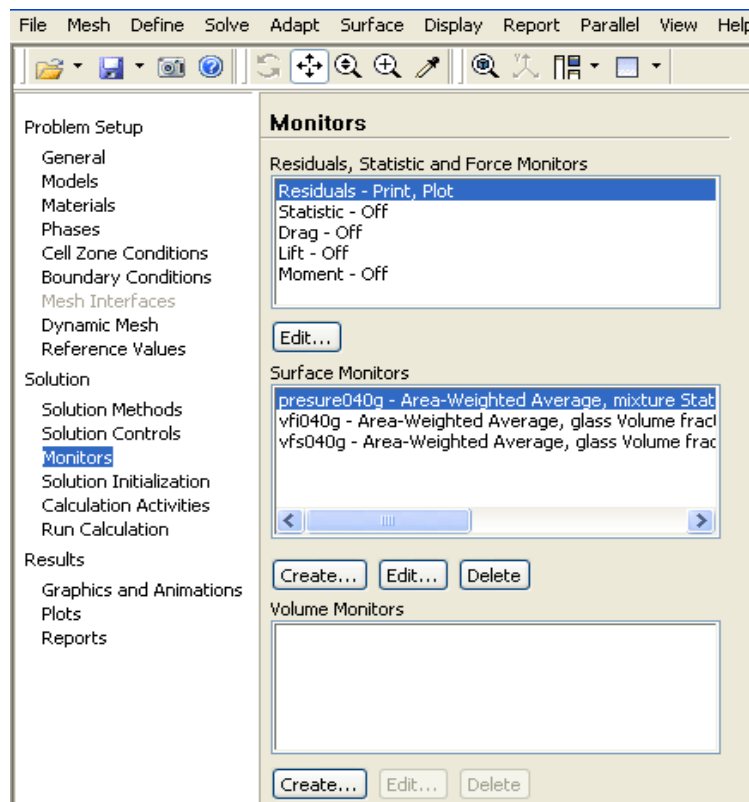


Figura 5.13. Menú de configuración “Monitors”

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Podremos desactivar también todas las pestañas y observar a que numero de iteraciones se estabilizan los residuos, dando, de este modo, un número un poco mayor de iteraciones por paso de tiempo y asegurando así, la calidad de nuestro problema.

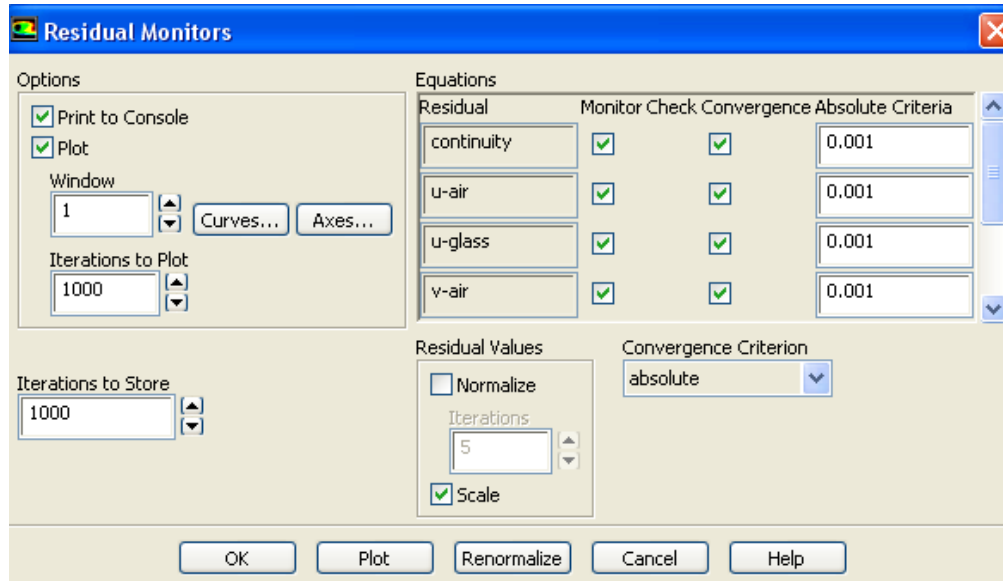


Figura 5.14. Menú de configuración “Residual Monitors”

Clic en “Create...” dentro de “Surface Monitors” y podremos hacer que el programa nos entregue cierta información que precisemos a la hora de realizar el estudio.

Dentro de este nuevo menú, podremos decidir si queremos la información representada en la consola, en una grafica (plot), o en un archivo, como una columna de datos (write).

Además debemos configurar el eje X, el eje de las iteraciones, es decir del tiempo, para que se un número de datos por unidad de tiempo.

Los puntos, líneas o superficies en las que se desee calcular una magnitud deben ser creados en el menú principal horizontal de Fluent, “Surface” ----> “Point...” o “Line/Rake”.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

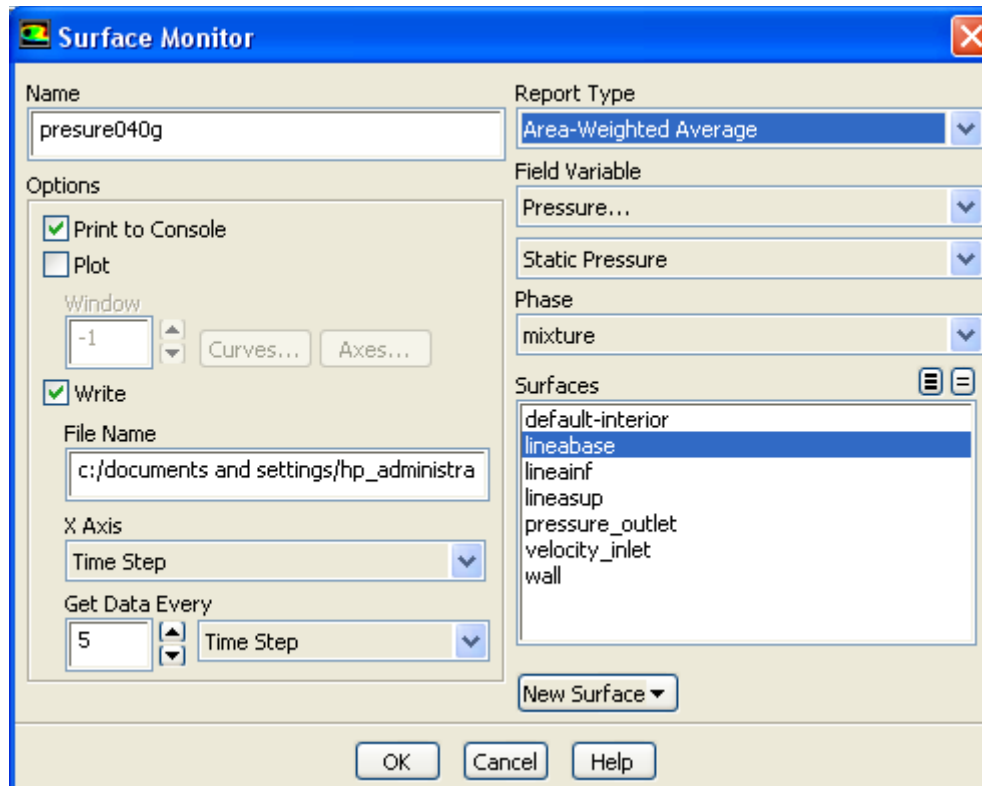


Figura 5.15. Menú de configuración “Surface Monitor”.

En la parte de la derecha del menú de la Figura 5.15, se seleccionará la magnitud y el lugar donde se desea medir, y el tipo de promedio o cálculo se realizará.

De este modo queda definido el monitor que se desea que el programa entregue, y si se requiere en un archivo (write), queda definido donde se quiere.

### 5.3.4 Inicialización de la solución (Solution Initialization).

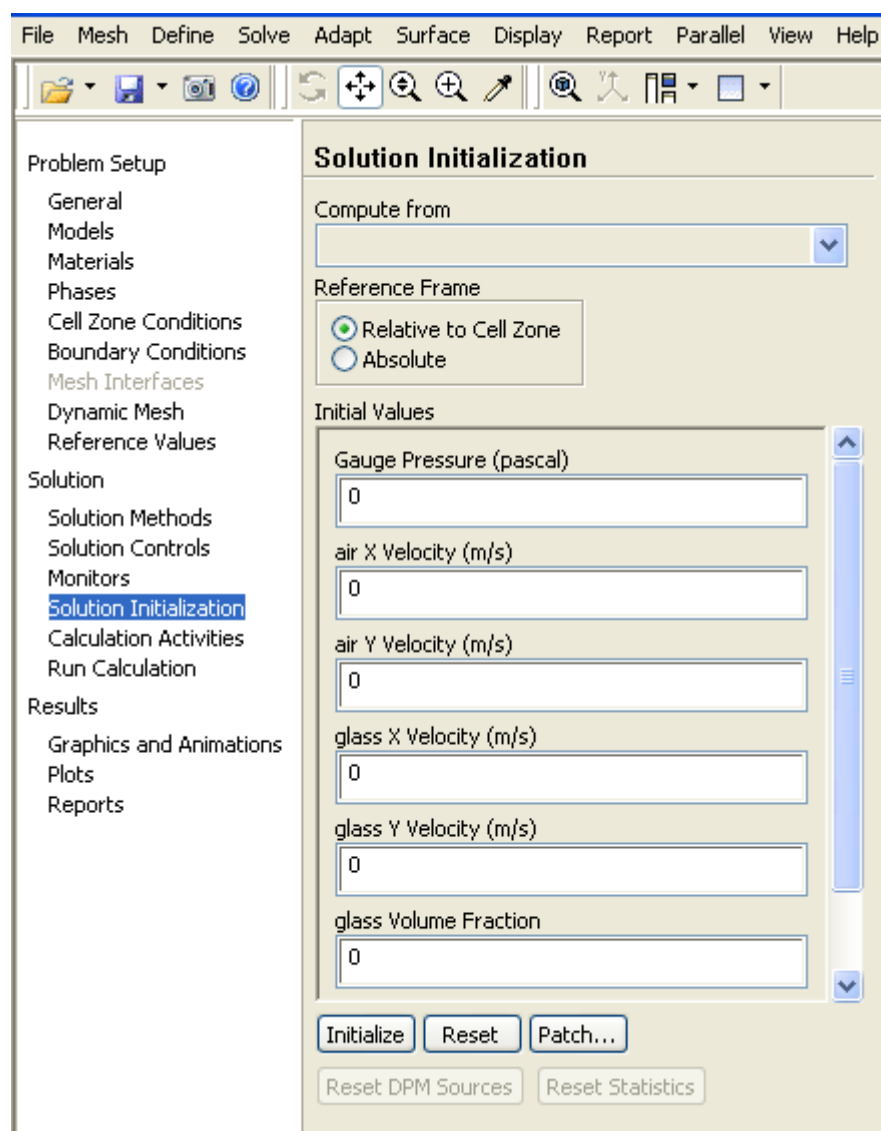


Figura 5.16. Menú de configuración “Solution Initialization”.

Este es un bloque de suma importancia, debido a que aquí se determina la región de la malla que ocupa el lecho fluidizado, donde se inicializa y resetea el proceso. Primeramente haremos clic una vez en “Initialize”.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

Para indicar al programa la altura del lecho, primero hacemos clic en “Adapt” ----> “Region...” y aparecerá un menú como el que se muestra en la Figura 5.17.

En este menú se introducirán, mediante cuatro puntos, las coordenadas de nuestra región cuadrada. Después de esto se hace clic en “Mark”.

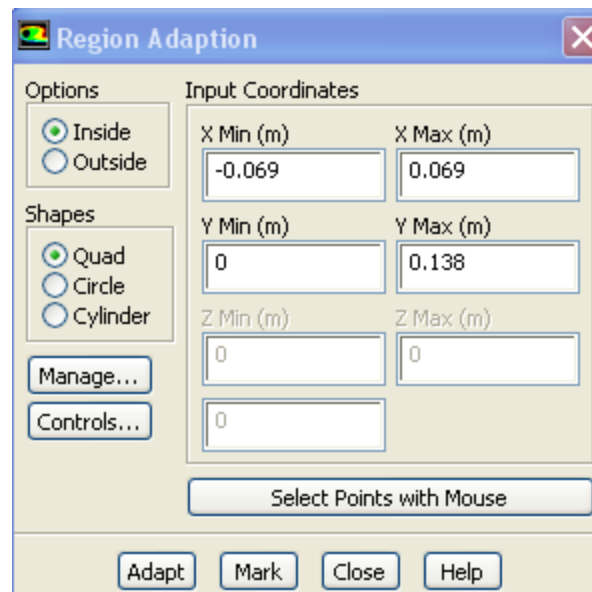


Figura 5.17. Menú de configuración “Region Adaption”.

Después de esto, en el menú de “Solution Initialization” se hará clic en el botón denominado “Patch...” y aparecerá el menú que ilustra la Figura 5.18, donde se utilizará la región definida anteriormente para definir el lecho. Para esto se introduce la fracción de volumen del lecho fijo, y su geometría, esta última a través de la región creada, llamada por el programa “hexahedron-r0”.



## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

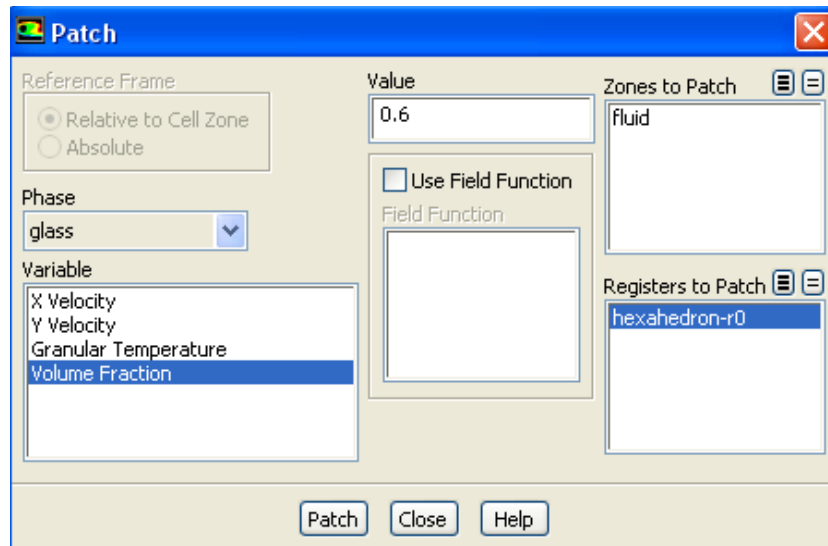


Figura 5.18. Menú de configuración “Patch”

Hacemos clic en el botón “Patch” y ya habremos terminado de configurar este modulo. Como se observa en la Figura 5.19, lecho fijo y resto de fluido quedan totalmente delimitados antes de empezar a simular.

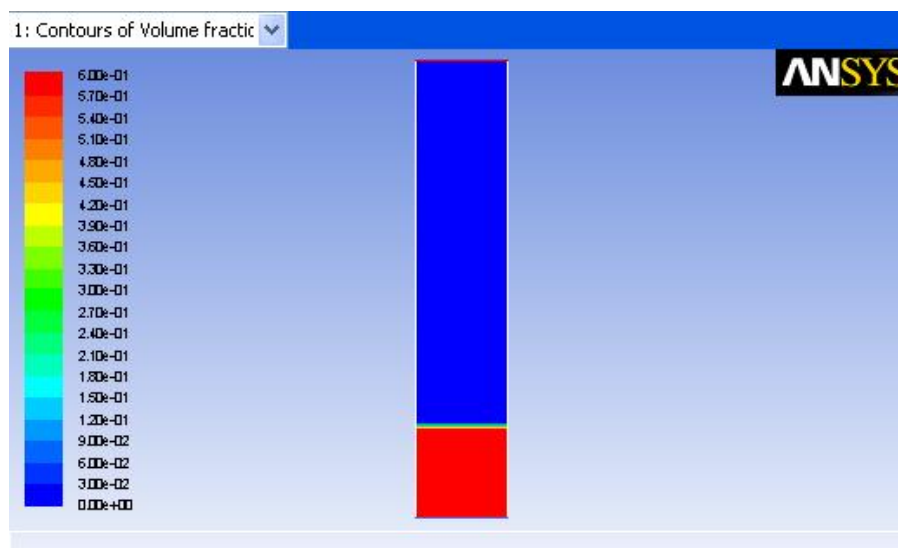


Figura 5.19. Contornos de fracción de volumen para “tiempo de simulación = 0s”.

### 5.3.5 Actividades de cálculo (Calculation Activities).

Este menú permite configurar tanto funciones de auto guardado, como comando de ejecución. Estos últimos nos permiten extraer datos mediante comandos, pero la manera utilizada se considera mucho más sencilla la adquisición de datos a través de “Monitors”.

En particular, el auto guardado se ha realizado en el estudio cada 5000 pasos de tiempo, es decir, cada 0.5 s. Esto se puede modificar según las especificaciones del usuario, pero dado el caso del estudio, se considera apropiado.

### 5.3.6 Ejecución del cálculo (Run Calculation).

Menú encargado de la configuración del proceso iterativo, como el tamaño del paso de tiempo “Time Step Size”, o el número de pasos de tiempo “Number of Time Steps”. Como se observa en la Figura 5.22, el tamaño de paso de tiempo es 0.0001 s y el número de pasos de tiempo son 100000, dando un total de 10 s de simulación por caso. Además para asegurarse de que el lecho está totalmente fluidizado, se han simulado 2.5 s previos antes de la toma de datos. También queda definido el número máximo de iteraciones por paso de tiempo, que en este caso son 100, pero no son necesarias todas ellas para conseguir el nivel de precisión requerido.

Cuando se halla configurado el proceso iterativo como se desee, se hace clic sobre “Calculate”, e empezara el proceso iterativo. Dependiendo de la precisión, del tamaño del paso de tiempo y del número de pasos de tiempo, la simulación se alargará más o menos. Las simulaciones pueden durar varios días en un ordenador de características domesticas.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

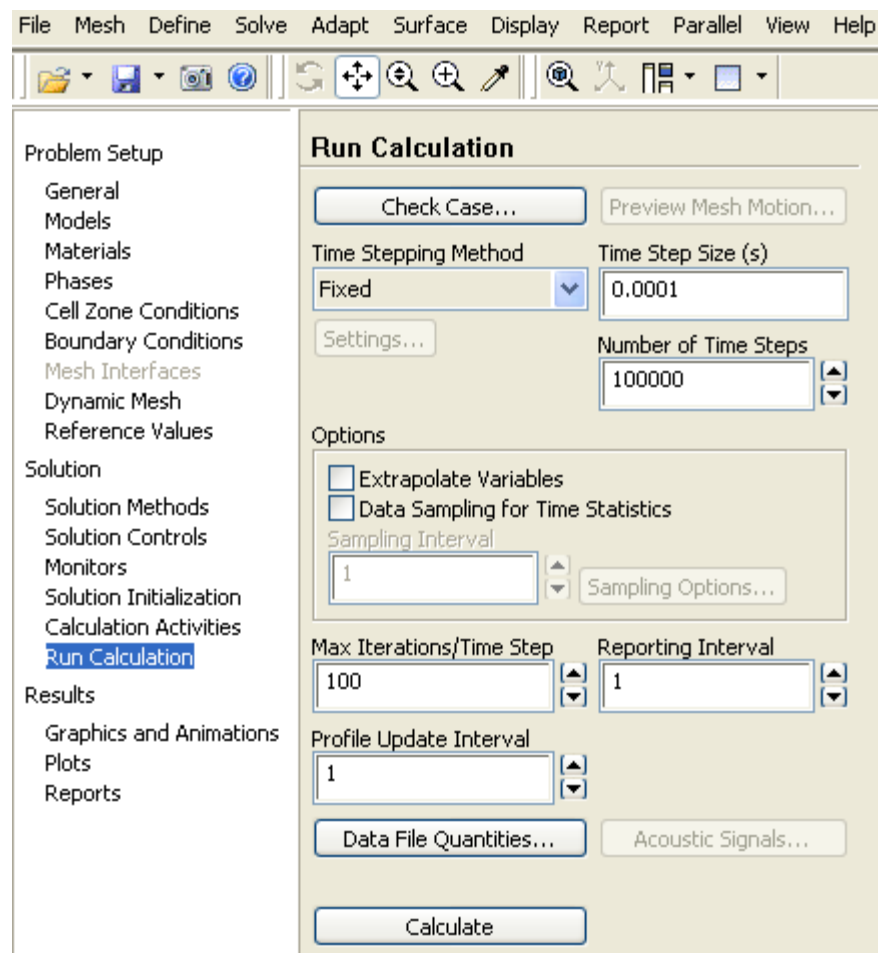


Figura 5.20. Menú de configuración “Run Calculation”.

### 5.4 Resultados (Results). Postproceso.

#### 5.4.1 Gráficos y animaciones (Graphics and Animations).

Este módulo está destinado a gestionar las gráficas o animaciones que deseamos visualizar de distintos ámbitos del estudio. A modo de ejemplo, en la Figura 5.21, se muestra un gráfico de contorno de la fracción de volumen del lecho que se utiliza para poder comprobar de manera visual que la simulación funciona

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

correctamente y en la Figura 5.22 se muestra los vectores de velocidad de aire a la entrada, en la parte inferior del lecho.

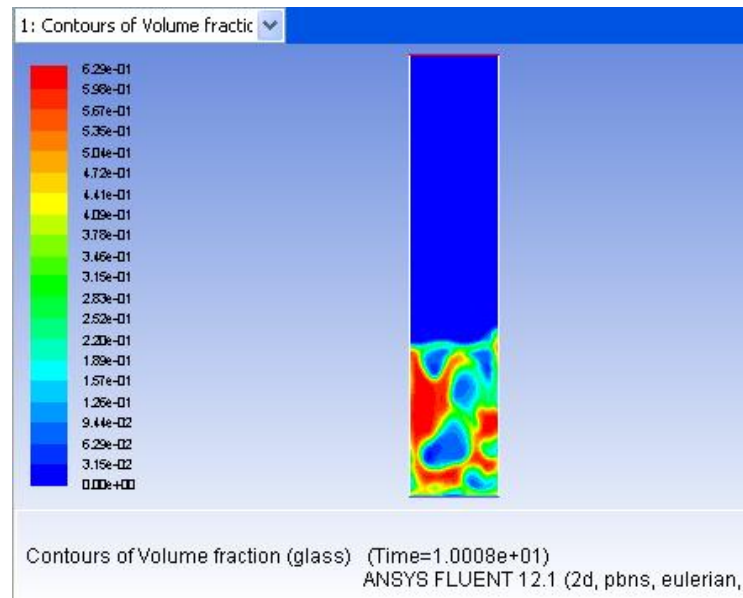


Figura 5.21. Contornos de Fracción de Volumen (Volume Fraction)

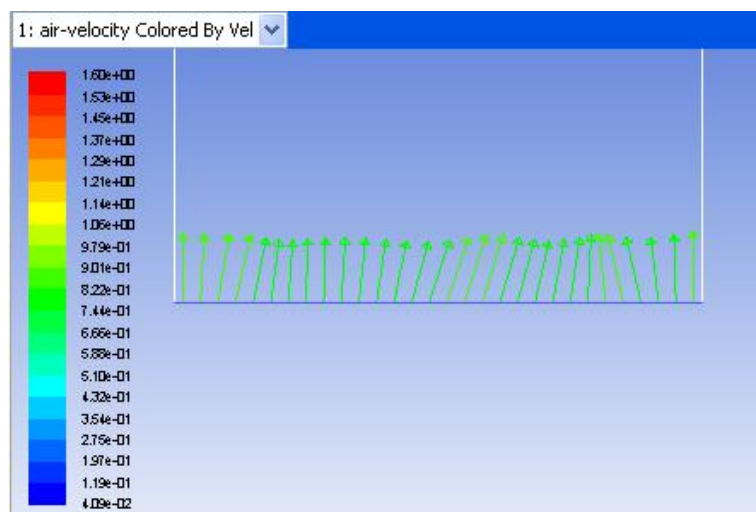


Figura 5.22. Vectores de velocidad del aire en la entrada.

## CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA

### 5.4.2 Representaciones (Plots).

Módulo destinado a la representación de datos requeridos en gráficas de tipo geométrico, donde uno de los ejes se corresponde con alguna de las longitudes físicas de nuestra simulación, y la otra con un parámetro también característico de la simulación.

A su vez también se puede acceder a menús de configuraciones avanzadas, como histogramas o perfiles de datos interpolados, pero no será necesaria la utilización de estas partes.

En la Figura 5.23, se muestra una imagen, en la que en la coordenada X se ve representada la longitud transversal (perpendicular al eje principal de simetría) del lecho, y en la coordenada Y se representan valores de fracción de volumen, para dos alturas diferentes.

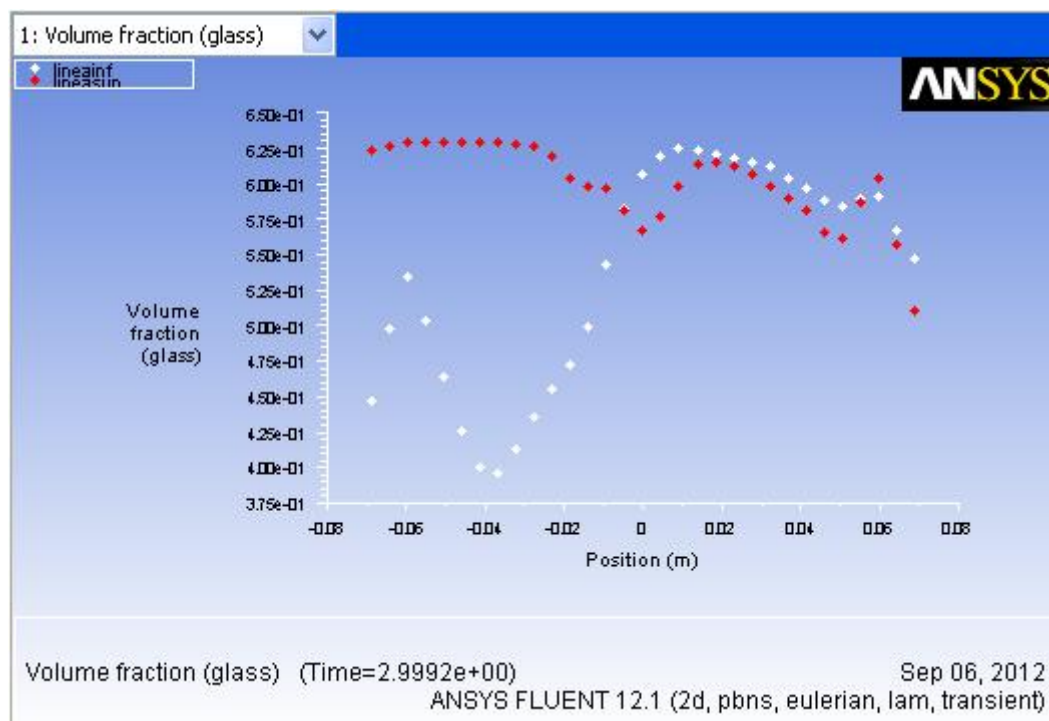


Figura 5.23. Representación XY de la Fracción de Volumen VS posición geométrica del lecho para las dos alturas donde se han tomado las medidas de Fracción de Volumen.

**Referencias bibliográficas Capítulo 5**

[2] Apartado 4

[10]

[11]

### 6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas todas las simulaciones, y obtenidos todos los archivos de datos, se llega al punto de tratar esos archivos. En cada simulación se obtendrá un valor de la fracción de volumen cada 0,0005 s, es decir, 20000 valores a lo largo de 10 s. Se utilizara el programa de cálculo MATLAB, para generar un programa que ayude a leer estos datos y a estudiar las variables que interesen. Así podremos obtener numerosa información que nos ayudara a caracterizar los regímenes de funcionamiento de un lecho fluidizado, y también comparar esta información con el artículo científico de Y. T. Makkawi et al., 2002 [2], nombrado ya anteriormente.

Podremos dividir este análisis de los resultados en tres bloques, para diferenciar los diferentes aspectos donde se va a centrar la atención. Estos se centrarán, en primer lugar, en un análisis de la fracción de volumen de sólido, dependiendo de las distintas velocidades, para las dos alturas de cálculo. En segundo lugar el análisis se centrará en las desviaciones estándar de la fracción de volumen de sólido, para cada velocidad. En tercer lugar, se trabajará con amplitudes de fracción de volumen.

La información que se obtenga de estos análisis permitirá caracterizar tres regímenes de funcionamiento bien diferenciados, que son, por orden de aparición en función de la magnitud de la velocidad, el régimen de burbujeo, el régimen de slugging y el régimen turbulento.

En la Figura 6.1 y 6.2 se muestra de manera grafica la fracción de volumen de solido en el lecho para distintas velocidades, las cuales se han seleccionando según el caso experimental, para que perteneciesen a estos tres regímenes.

La Figura 6.1 pertenece a la simulación realizada basándose en el modelo de arrastre de Gidaspow y la Figura 6.2 es la perteneciente al modelo de arrastre de Syamlal – O'brien.

Todas las capturas están realizadas a 7.5 s de iniciar la simulación, es decir, 2.5 s de pre-simulación y 5 s de simulación.

Se puede observar como a mayor velocidad mayor estado de agitación, burbujas más grandes, o como se aprecia en el régimen correspondiente a  $U = 1$  m/s, el régimen turbulento, múltiples burbujas simultaneas.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

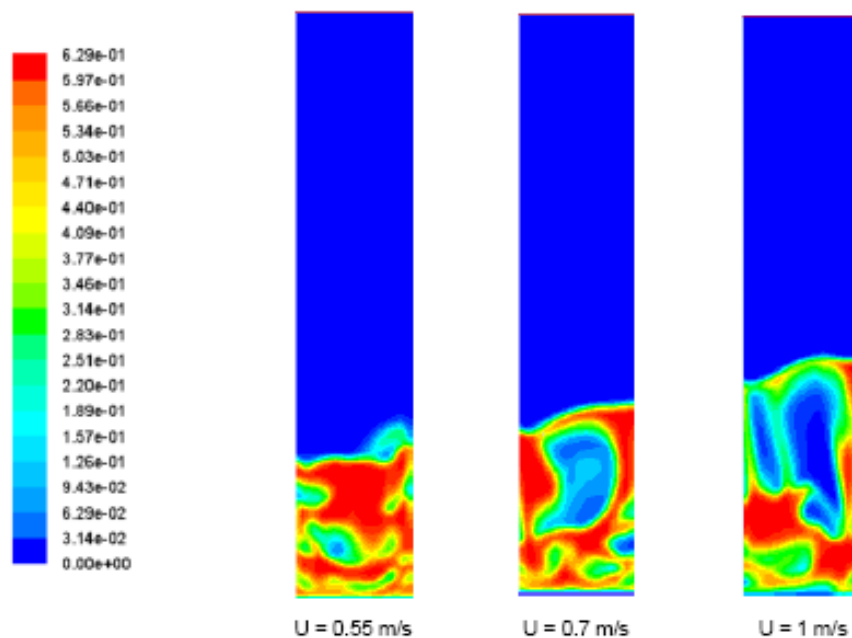


Figura 6.1. Contornos de fracción de volumen de sólido para distintas velocidades. Modelo de arrastre de Gidaspow.

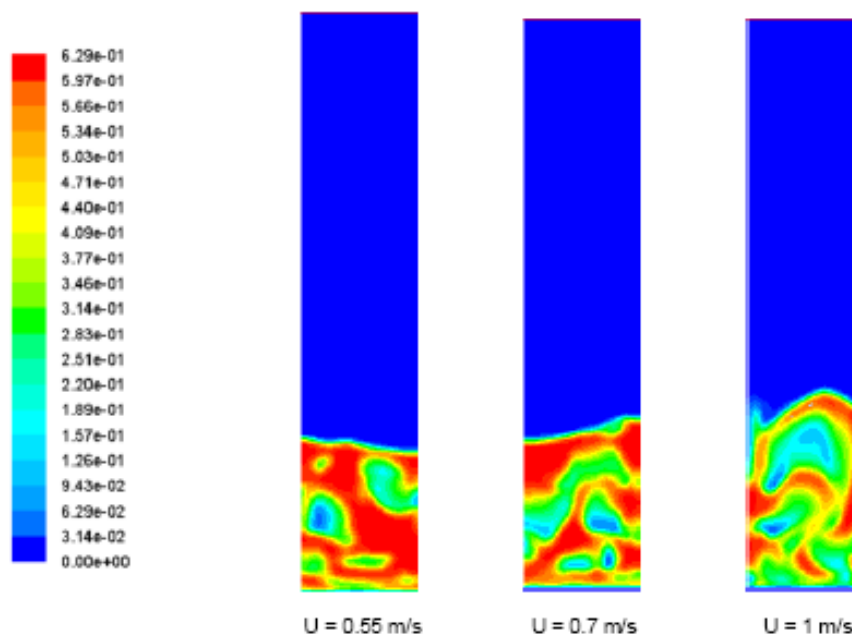


Figura 6.2. Contornos de fracción de volumen de sólido para distintas velocidades. Modelo de arrastre de Syamlal – O'Brien.



## 6.1 Análisis de la fracción de volumen.

Observando la promedio a lo largo de una línea de fracción de volumen de sólido (fase partícula), para cada una de las distintas alturas, 0.0184 m y 0.598 m, y para cada una de las distintas velocidades, se puede tener una idea del nivel de agitación del lecho, es decir, el número de burbujas que está desarrollando, su tamaño, y velocidad.

Pero también indica cómo va variando el lecho según aumentamos la velocidad, debido a que esta fracción de volumen de sólido no progresa igual para todo el rango de velocidades. Estudiando esta variación pueden estudiar los distintos regímenes de funcionamiento.

En la Figura 6.3, se puede observar una representación de la media de la fracción de volumen, para dos alturas distintas, frente a la velocidad, y los distintos regímenes bien diferenciados. Aparecen seis regímenes distintos, desde lecho fijo,

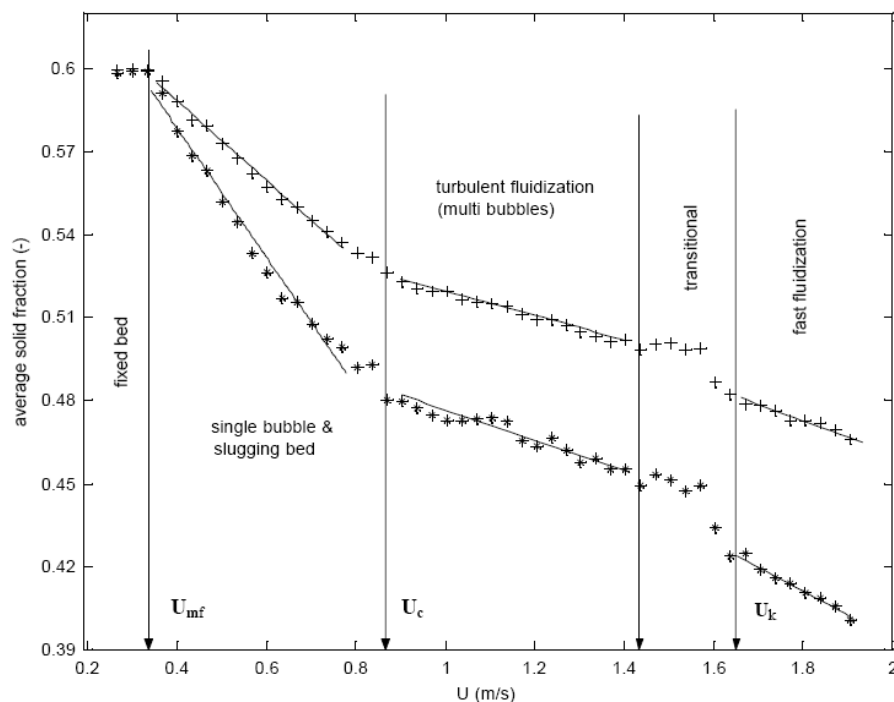


Figura 6.3. Promedio de la fracción de volumen frente a velocidad en el caso experimental.  
Y. T. Makkawi et al., 2002 [2].

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

pasando por burbujeante, slugging, turbulento, una transición y por ultimo fluidización rápida. Solo se estudiarán los tres primeros sin contar con el lecho fijo, es decir, el régimen de burbujeo, el régimen de slugging, y el régimen turbulento debido al alto coste computacional que conlleva realizar simulaciones para tiempos largos con el fin de obtener datos estadísticos suficientes para poder llevar a cabo el estudio. Se puede apreciar que la pendiente que aparece en el régimen de burbuja aislada y en el régimen de slugging es la misma. Luego esta pendiente se suaviza en el régimen turbulento, continuando con pendiente negativa, pero considerablemente más tenue. Por tanto, a la velocidad a la que cambia la tendencia de estas rectas es la velocidad que separa el régimen de slugging y el régimen turbulento, encontrándose este último por encima de esta velocidad. Se denominará esta velocidad  $U_c$ .

La figura 6.4 muestra los mismos resultados que la figura 6.3, obtenidos de la simulación para distintas velocidades para el modelo de arrastre de Gidaspow. Como se puede observar las pendientes difieren sobre  $U_c \approx 0.76$  m/s aproximadamente, lo cual se aproxima en gran medida a la referencia que presenta la gráfica correspondiente al caso experimental, que sitúa esta velocidad

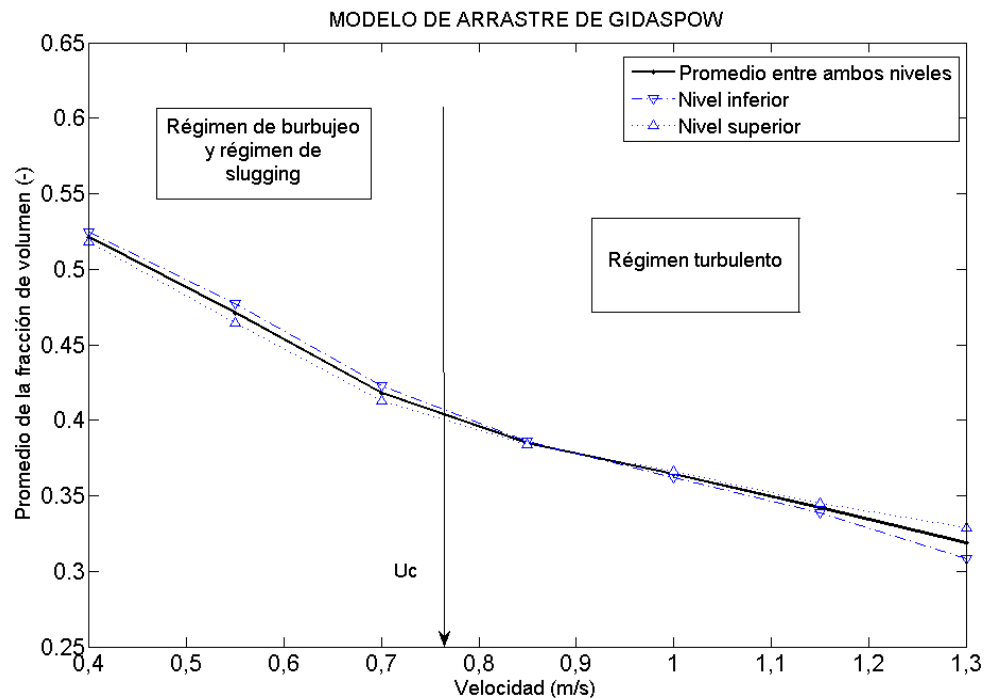


Figura 6.4. Fracción de volumen frente a velocidad (Modelo de arrastre de Gidaspow)

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

de cambio de régimen en  $U_c \approx 0.86$  m/s. Para el modelo de arrastre de Syamlal – O'brien, los regímenes se separan aproximadamente en  $U_c \approx 0,82$  m/s, lo cual se asemeja más al caso experimental. Teniendo en cuenta que se trata de una simulación, no contando con el mismo número de velocidades de referencia, y al haber simplificado la geometría a un caso en 2D, la comparación cuantitativa pierde importancia. No se pretende que los valores coincidan, sino que las tendencias sean similares, a pesar de la diferencia numérica obtenida, la tendencia de las curvas es similar y además queda bien definida la velocidad a la que observamos el cambio de régimen de slugging a régimen turbulento, y que será denominada

Podemos observar, en cuanto a los diferentes modelos de arrastre, en las figuras 6.4 y 6.5, que en el lecho simulado utilizando el modelo de Gidaspow, el promedio de fracción de volumen a 0.4 m/s es sensiblemente inferior al de Syamlal – O'brien. Puede ser dicho pues, que el lecho simulado utilizando el modelo de Gidaspow fluidiza completamente a una velocidad ligeramente inferior.

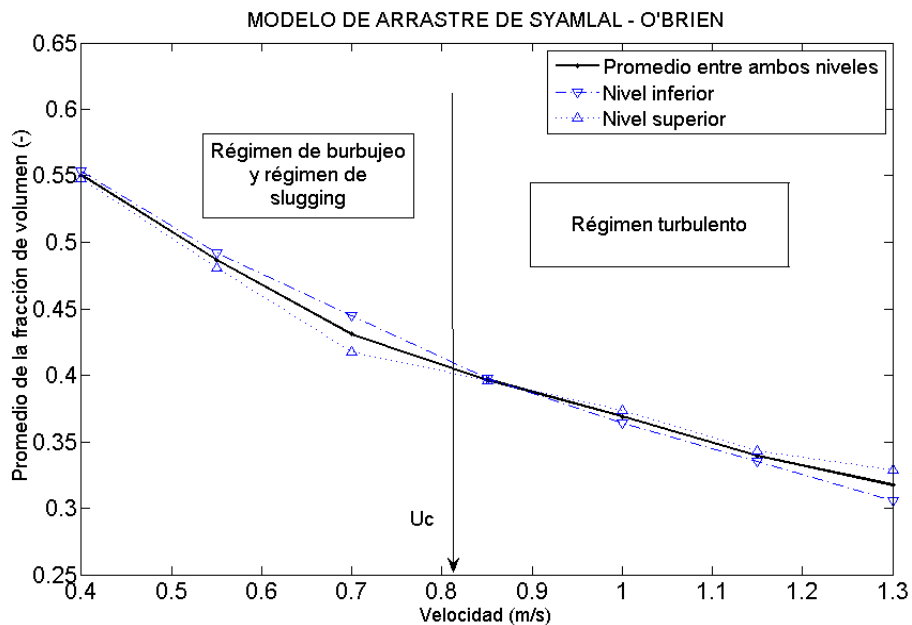


Figura 6.5. Fracción de volumen frente a velocidad (Modelo de arrastre de Syamlal – O'brien)

Las graficas son equivalentes, diferenciándose bien las dos distintas pendientes, y separando el régimen turbulento del régimen de burbujeo y el régimen de slugging.

## 6.2 Análisis de la desviación estándar de la fracción de volumen.

Una vez analizados los promedios de fracción de volumen realizados con los datos obtenidos, se pasará a trabajar con las desviaciones estándar de estos bloques de datos de fracción de volumen para cada velocidad y para cada altura de cálculo.

La Figura 6.6 ilustra la desviación estándar de la fracción de volumen frente a la velocidad para el caso experimental (Makkawi, 2002). Podemos observar como ahora se puede diferenciar entre el régimen de burbujeo y el régimen de slugging. Esta separación se establece en el punto en el que la pendiente de la curva deja de tener un comportamiento lineal. Esta velocidad se denomina  $U_s$ . Aproximadamente esta gráfica sitúa este valor en  $U_s \approx 0.64$  m/s, y parece guiarse mas por la curva obtenida en el punto superior. La separación entre el régimen turbulento y el de slugging, según se estudió en el punto anterior, está definida por  $U_c \approx 0.86$  m/s. En este caso, y fijando el valor 0.86 m/s, los máximos de las curvas de desviación estándar de la fracción de volumen de solido se deben encontrar en torno a este valor.

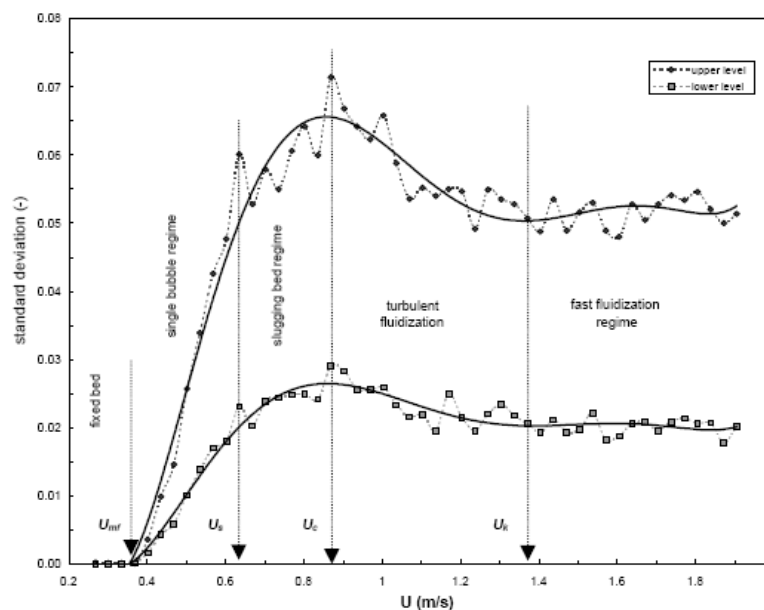


Figura 6.6. Desviación estándar de la fracción de volumen en el caso experimental.  
Y. T. Makkawi et al., 2002 [2].

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las Figuras 6.7 y 6.8, se puede observar la tendencia de estas curvas de la desviación estándar de la fracción de volumen frente a velocidad, obtenidas con los datos de la simulación. En la Figura 6.5, correspondiente al modelo de arrastre de Gidaspow, tenemos  $U_s \approx 0.6$  m/s. Se puede observar que los regímenes aparecen a velocidades un poco más bajas que en caso experimental. Como ya se comentó en el apartado 6.1, como se aprecia en el análisis de la fracción de volumen, en el modelo de arrastre de Gidaspow los regímenes aparecen a velocidades ligeramente por debajo de las del caso experimental.

En la Figura 6.8, que se corresponde con el modelo de arrastre de Syamlal – O'Brien, podemos observar como las velocidades en las que tenemos un cambio de régimen son más parecidas a las del caso experimental, siendo  $U_s \approx 0.63$  m/s.

Debido a que el número de velocidades implementadas en la simulación es menor que en el experimento, harían falta más puntos para poder observar la tendencia de la variación de la desviación estándar de la fracción de sólidos. Por esta razón se ha utilizado un ajuste (SPLINE), para suavizar la unión entre los distintos puntos y poder estimar el cambio de pendiente anteriormente comentado, teniendo en cuenta como validos los resultados del apartado anterior. Por esta razón la curva correspondiente al modelo de Gidaspow se asemeja más en la forma que la del modelo de Syamlal – O'Brien. El hecho de no contar con tantas velocidades de cálculo, solo siete, hace que la graficas obtenidas difieran ligeramente de la forma que tendrían con simulaciones a más velocidades, es decir, con más puntos. Si se contaran con datos correspondientes a más velocidades, la forma de estas curvas se asemejaría más a la de caso experimental.

En la parte derecha de las gráficas, la definida por el último punto a velocidad  $U = 1.3$  m/s, podemos observar, que para ambos modelos de arrastre la desviación estándar de la fracción de volumen de solido asciende considerablemente, siendo esto característico del régimen de transición, aunque no se puede concluir, con la información que ofrecen estas graficas y sin contar con la información de otros análisis, que se trate de este régimen.

Cabe señalar también que las gráficas correspondientes a la simulación alcanzan su máximo a menor velocidad que en el caso experimental, y su descenso no es tan pronunciado.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

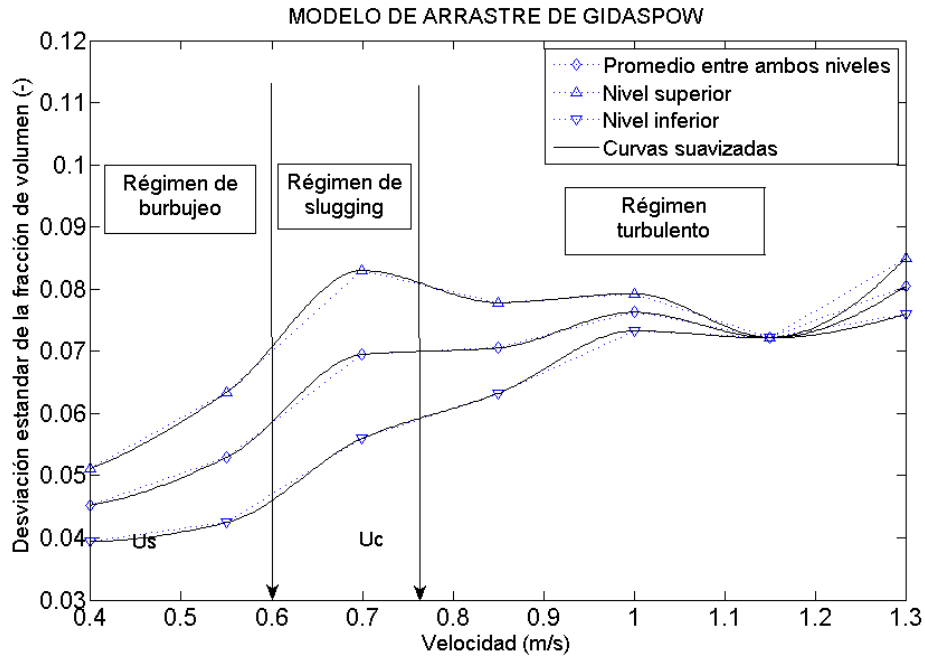


Figura 6.7. Desviación estándar de la fracción de volumen de sólido frente a velocidad. (Modelo de arrastre de Gidaspow).

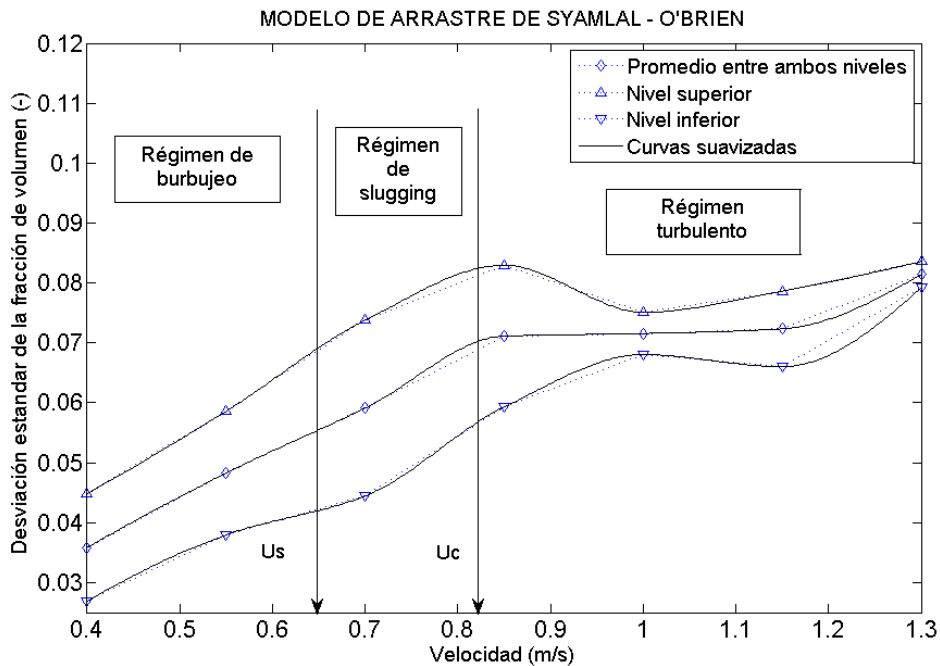


Figura 6.8. Desviación estándar de la fracción de volumen de sólido frente a velocidad. (Modelo de arrastre de Syamlal-O'Brien).

### 6.3 Análisis de la amplitud de la fracción de volumen.

En esta parte se pretende realizar un análisis de las amplitudes de la fracción de volumen. Para ello, se implementarán las señales de fracción de volumen frente al tiempo. Lo que se obtendrá serán gráficas discretas de carácter ondulatorio irregular. El objetivo es calcular las todas las amplitudes correspondientes a cada bloque de datos.

Como podemos observar en la Figura 6.9, se pretende calcular las amplitudes que mantienen entre todos los máximos y los mínimos. De este modo obtendremos otro conjunto de datos para cada simulación. El estudio de las amplitudes y la manera en que estas se repiten, es decir la frecuencia con la que aparecen, es de gran importancia a la hora de caracterizar los regímenes de funcionamiento del lecho, siendo otra fuente importante de información.

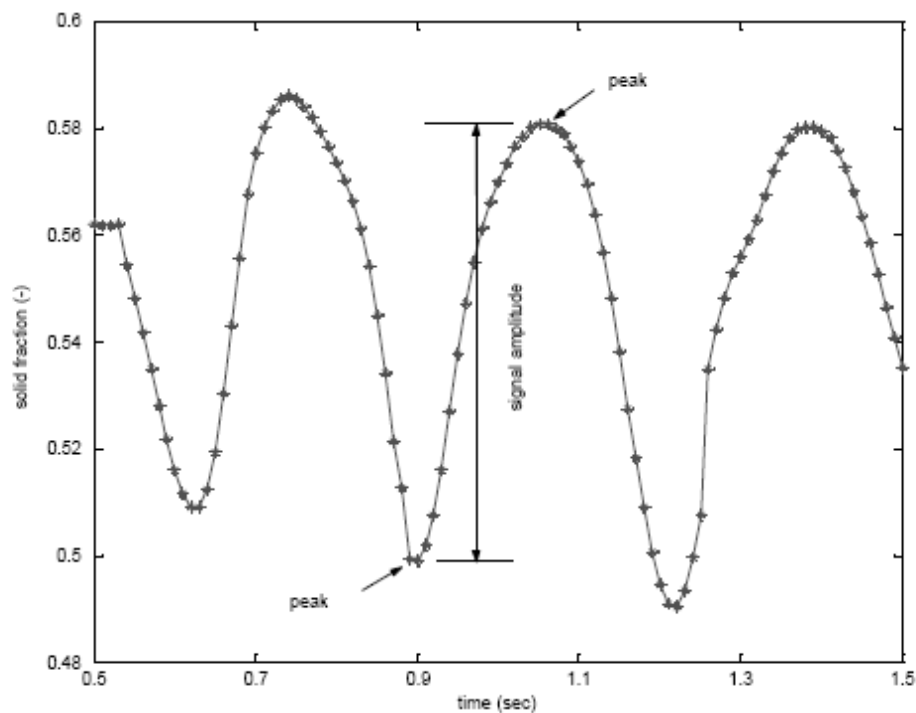


Figura 6.9. Señal aleatoria de fracción de volumen frente a tiempo.  
Y. T. Makkawi et al., 2002 [2].

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Uno de los análisis a realizar en relación a estas amplitudes será el análisis de la desviación estándar de las amplitudes frente a la velocidad. Así, como se observa en la Figura 6.10, las curvas tienen esta forma para el caso experimental. En esta figura aparecen el promedio de la amplitud, la desviación estándar de la amplitud y promedio normalizado de la amplitud.

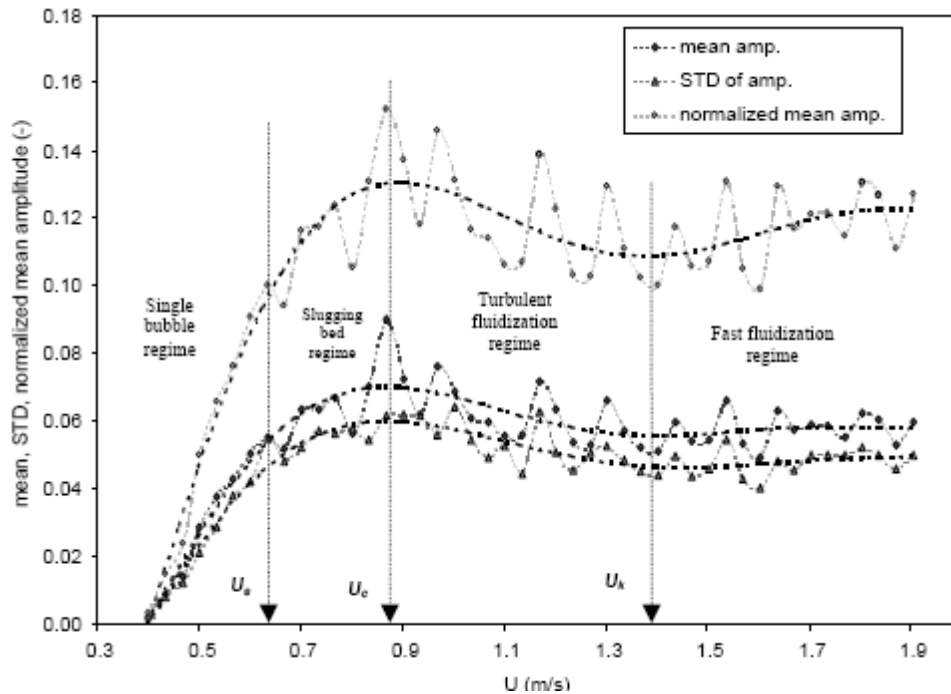


Figura 6.10. Promedio, desviación estándar y promedio normalizado de la amplitud.  
Y. T. Makkawi et al., 2002 [2].

En las Figuras 6.11 y 6.12, se puede observar la evolución de la desviación estándar de la amplitud frente a la velocidad, de tal modo que, al igual que las graficas de desviación estándar de fracción de volumen de sólido, somos capaces de determinar a qué velocidad tenemos cambios de régimen de funcionamiento. De este modo, acorde con las estas gráficas, los regímenes quedan prácticamente definidos de igual manera que con el análisis de la desviación estándar de la fracción de volumen de sólido. Las curvas en los dos casos tienen forma similar, pero un poco por encima la de desviación estándar de la amplitud que las de la fracción de volumen, alcanzando las primeras, valores máximos ligeramente superiores.



## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

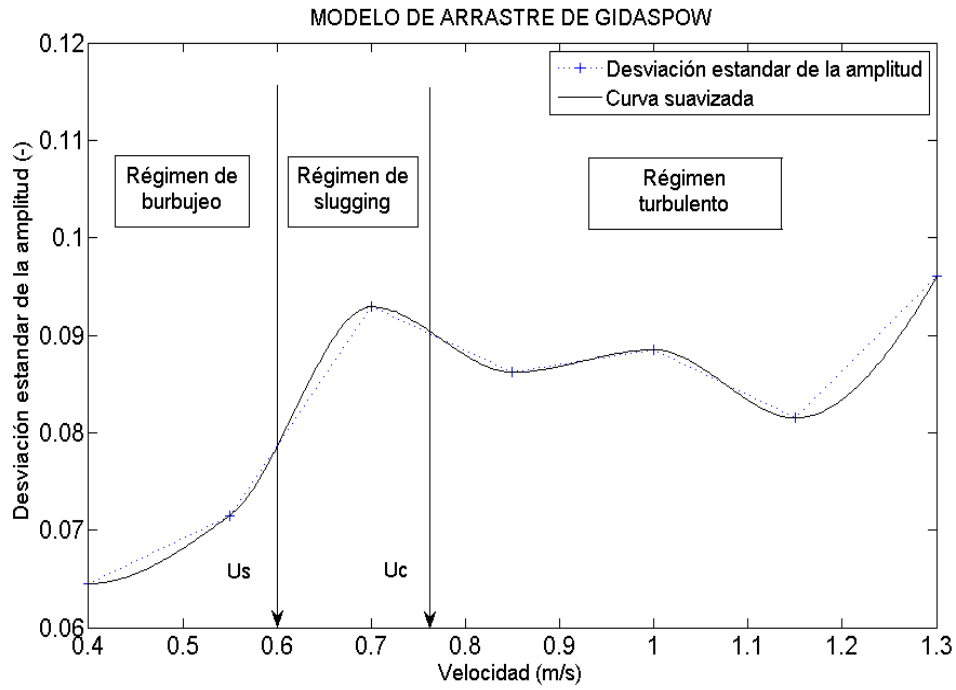


Figura 6.11. Desviación estándar de la amplitud. (Modelos de arrastre de Gidaspow).

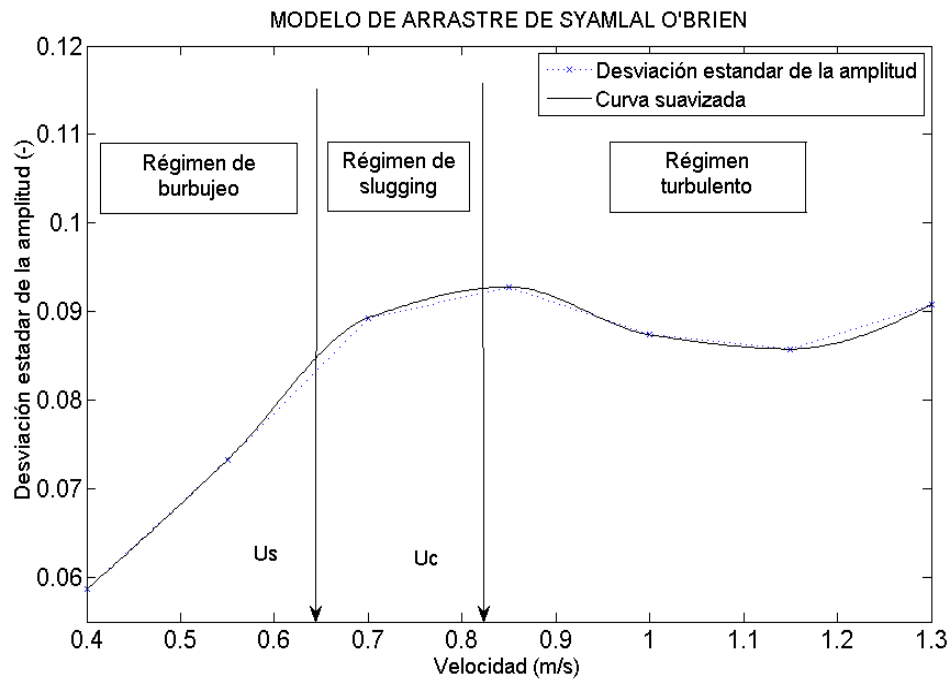


Figura 6.12. Desviación estándar de la amplitud, (Modelo de arrastre de Syamlal – O'brien).

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para obtener información adicional a partir de estos datos de amplitud, también se ha considerado implementar la función normal de densidad de probabilidad.

$$p(\text{amp}) = \frac{1}{\sigma_{\text{amp}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\text{amp} - \overline{\text{amp}}}{\sigma_{\text{amp}}} \right)^2 \right] \quad (6.1)$$

donde  $\text{amp}$  es la variable amplitud,  $\overline{\text{amp}}$  es la media de la variable amplitud y  $\sigma_{\text{amp}}$  es la desviación estándar de la variable amplitud.

En la Figura 6.13 se pueden observar los resultados de las funciones normales de densidad de probabilidad de la amplitud, pertenecientes al caso experimental.

Estas gráficas muestran que la distribución de amplitud es directamente proporcional al incremento de la velocidad, antes de alcanzar el límite de la fluidización en régimen turbulento, después de la cual, la distribución de la amplitud cambia inversamente, disminuyendo según se aumenta la velocidad del gas. Como es de esperar, la distribución de amplitud máxima se da a la velocidad que comienza el régimen turbulento, es decir, para  $U_c = 0.84 \text{ m/s}$ . En este régimen el lecho se mueve como un pistón, debido al incremento del diámetro de la burbuja y la señal recogida de fracción de volumen idealmente debería oscilar entre el valor de lecho fijo ( $\sim 0.6$ ) y valor de vacío total ( $\sim 0$ ). En el régimen turbulento las curvas se mueven hacia la derecha, pero se mantienen en una distribución amplia, indicando menor probabilidad de una alta concentración de sólidos, debido a la descomposición de los slugs.

También es importante señalar que no existen gráficas para velocidades comprendidas en el rango  $1.43 \text{ m/s} \leq U \leq 1.65 \text{ m/s}$ , es decir, el intervalo donde aparece el régimen de transición.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

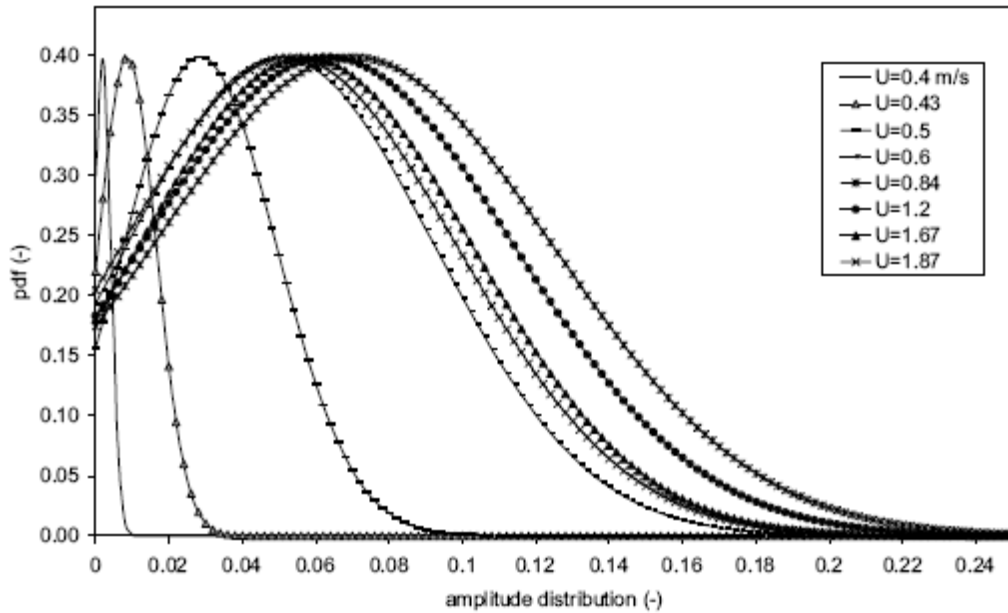


Figura 6.13. Densidad de probabilidad de la señal de amplitud para varias velocidades de gas.

Y. T. Makkawi et al., 2002 [2].

En las figuras 6.14 y 6.15, se muestra el análisis realizado a partir de la variable amplitud, para los dos modelos de arrastre simulados. Estas gráficas están elaboradas del mismo modo que la que aparece en la figura 6.12, pero sin incluir velocidades del régimen de fluidización rápida, para el cual no se han realizado simulaciones.

Para el modelo de arrastre de Gidaspow,  $U_c \approx 0.76$  m/s, así, la gráfica que más se aproximará a esta velocidad será la de  $U = 0.7$  m/s. Por eso esta gráfica es prácticamente la de mayor amplitud, y solo es superada por la que corresponde a  $U = 1.3$  m/s. Se puede comprobar que las gráficas aumentan su amplitud hasta el valor  $U = 0.7$  m/s, y a partir de ahí van decreciendo según se aumenta la velocidad. Esto se cumple con la excepción de la última gráfica, correspondiente a  $U = 1.3$  m/s. Ya que, en comparación con el caso experimental, se ha verificado que los regímenes aparecen a una velocidad inferior para este modelo de arrastre, sería lógico pensar que el régimen de transición apareciese un poco antes también, pero al diferir esta gráfica de la tendencia, es seguro que a  $U = 1.3$  m/s nos encontramos ya en el régimen de transición, el cual no sigue la tendencia del resto de regímenes.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

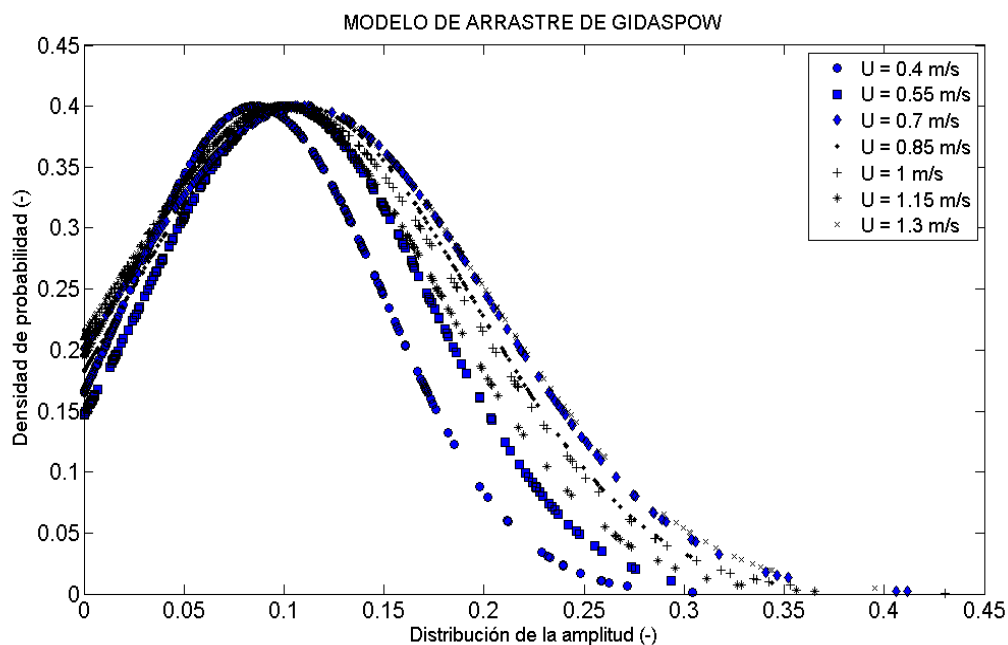


Figura 6.14. Densidad de probabilidad de la variable amplitud para distintas velocidades de gas. (Modelo de arrastre de Gidaspow).

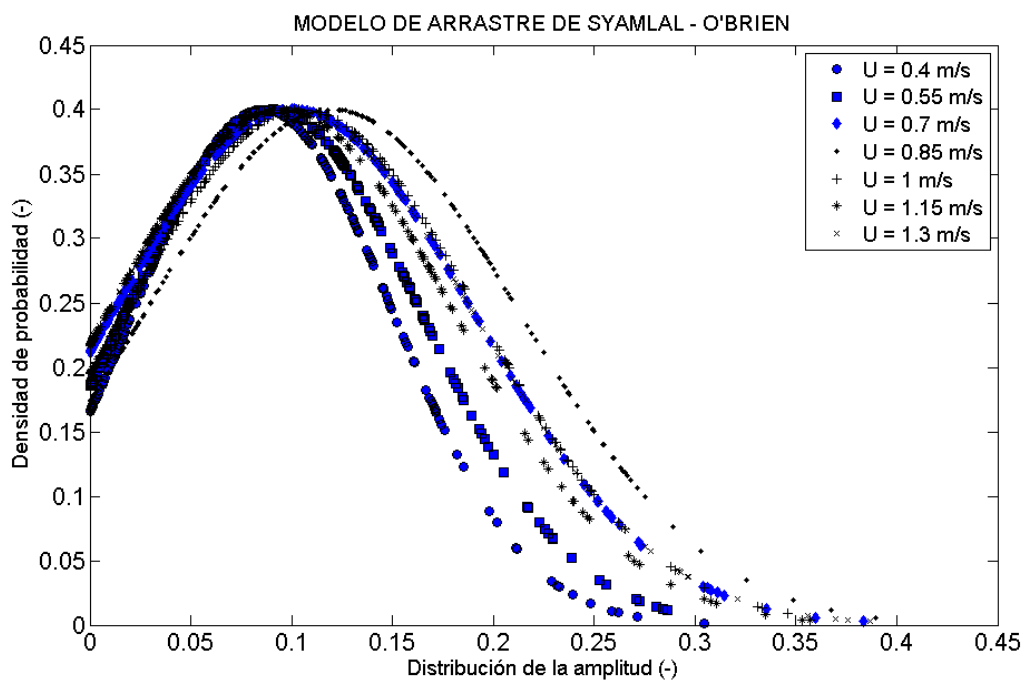


Figura 6.15. Densidad de probabilidad de la variable amplitud para distintas velocidades de gas. (Modelo de arrastre de Syamlal – O'brien).

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el modelo de Syamlal – O’Brien,  $U_c \approx 0.82$  m/s, de tal modo que la gráfica correspondiente a la velocidad que se aproxima más a esta será  $U = 0.85$  m/s. Por este motivo, esta será la que más amplitud tenga, ya que es la más próxima a  $U_c$ . Las gráficas van aumentando la amplitud proporcionalmente con la velocidad, hasta  $U_c$ , comenzando a disminuir su amplitud a medida que se siga aumentando la velocidad. Se puede observar también que la gráfica correspondiente a  $U = 1.3$  m/s pierde esta tendencia decreciente y se muestra ligeramente más amplia que la de  $U = 1.15$  m/s. Como ocurría en el caso del modelo de arrastre de Gidaspow, esta pérdida de tendencia se debe a que  $U = 1.3$  m/s pertenece al régimen de transición.

En el caso del modelo de Gidaspow, la amplitud correspondiente a la gráfica de  $U = 1.3$  m/s, era más grande que la máxima, y en el modelo de Syamlal – O’Brien, solo es ligeramente más amplia que la correspondiente a  $U = 1.15$  m/s. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que para los dos casos los regímenes han aparecido a velocidades ligeramente inferiores, entonces sería lógico afirmar que el régimen de transición también apareciese antes.

Comparando los dos modelos, los regímenes aparecen antes para el modelo de Gidaspow, por eso la gráfica correspondiente a  $U = 1.3$  m/s queda por encima de todas las demás, y en el caso de Syamlal – O’Brien, la gráfica solo queda por encima de la correspondiente a  $U = 1.15$  m/s, perdiendo la tendencia, pero no superando en amplitud a todas las demás. En resumen, que la gráfica para el modelo de Gidaspow difiere más de la tendencia que la correspondiente al modelo de Syamlal – O’Brien porque el régimen de transición aparece antes en el modelo de Gidaspow, como ocurría también con el régimen turbulento y el régimen de slugging.

Entonces, realizar este estudio, ofrece la posibilidad de saber a qué velocidad exactamente aparece el régimen de transición, que es la velocidad a la que se pierde la tendencia descendente en cuanto a la amplitud de las gráficas de densidad de probabilidad de la amplitud.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### **Referencias bibliográficas Capítulo 6**

[1]

[2]

### 7 CONCLUSIONES

La realización de este proyecto ha comprendido diferentes puntos, los cuales se resumen a continuación:

- Diseño mediante GAMBIT 2.4.6 de la malla que se importará desde FLUENT 12.1.2 CFD software para realizar las simulaciones.
- Configuración y ejecución de las simulaciones para dos modelos de arrastre distintos, el modelo de Gidaspow y el modelo de Syamlal – O'Brien.
- Tratamiento de la información mediante el programa de cálculo MATLAB R2008a. Para el tratamiento de ciertos datos fue necesario también general cuatro programas en lenguaje MATLAB.
- Comparación cualitativa entre los resultados obtenidos de las simulaciones y el caso experimental en el cual estas se basaban.

#### 7.1 Caracterización de los regímenes de fluidización del lecho.

Mediante los análisis de la fracción de volumen de sólido, de la desviación estándar de la fracción de volumen de sólido y de la amplitud de volumen de sólido se ha caracterizado el régimen de burbujeo, el régimen de slugging y el régimen turbulento.

Los resultados obtenidos del análisis de la fracción de volumen definen  $U_c$ , velocidad que marca la frontera entre el régimen de slugging y el régimen turbulento. En estas gráficas de fracción de volumen frente a velocidad, se pueden

## CONCLUSIONES

observar dos pendientes distintas. Prolongando gráficamente estas pendientes, en el punto donde cortan quedará definida  $U_c$ . Los resultados son aproximados, debido al no contar con tantos puntos como en el caso experimental, pero cualitativamente se consideran buenos. Esta velocidad  $U_c$ , es ligeramente inferior en las simulaciones que en el caso experimental, suponiendo un error del 13% en el caso de Gidaspow y un error del 4.87% para el caso de Syamlal – O'brien. En cuanto a la comparación entre los dos modelos, se puede afirmar que  $U_c$  es inferior en el caso de Gidaspow que en el caso de Syamlal – O'brien.

Gracias al análisis de la desviación estándar de la fracción de volumen de sólido, se puede definir  $U_s$ , velocidad umbral que define la frontera entre el régimen de burbujeo y el régimen de slugging. Al igual que ocurría con  $U_c$ ,  $U_s$  es ligeramente menor en las simulaciones que en el caso experimental, mostrando un error del 6.66% para el caso de Gidaspow y un error del 1.58% para el caso de Syamlal – O'brien. También,  $U_s$ , es menor en el caso de Gidaspow que en el caso de Syamlal – O'brien. También se puede definir  $U_c$  a través de este análisis de manera que reafirman los datos obtenidos del análisis de la fracción de volumen de sólido con los datos de este análisis, ya que los valores de  $U_c$  coinciden.

Por último, la información que brinda el análisis de la amplitud de la fracción de volumen, hace posible, en primer lugar, confirmar los valores de  $U_c$  y  $U_s$ , y en segundo lugar, gracias a las graficas de densidad de probabilidad, afirmar que el lecho trabajando a  $U = 1.3$  m/s, está trabajando en régimen de transición. No se sabe a qué velocidad exacta aparece este régimen, pero al igual que el resto de regímenes, aparece a velocidades ligeramente inferiores en las simulaciones que en el caso experimental. En cuanto a los dos modelos de arrastre, se ha comprobado que los regímenes aparecen a velocidades inferiores en el modelo de Gidaspow que en el modelo de Syamlal – O'brien. De tal modo es razonable pensar que el régimen turbulento aparezca también antes en el modelo de Gidaspow. Además, la pérdida de tendencia de la gráfica correspondiente a  $U = 1.3$  m/s, es mucho más significativa en el caso de Gidaspow, indicador de que se ha entrado en el régimen de transición a velocidad menor que en el de Syamlal – O'brien.

Gracias a estos tres análisis, se han podido definir tres regímenes de funcionamiento, y la aparición de un cuarto antes de lo previsto, el régimen de transición, cuya frontera no queda definida, aunque se puede afirmar que con  $U = 1.3$  m/s, nos encontramos en este régimen.



## CONCLUSIONES

### 7.2 Estudios posteriores.

Ya que el estudio se ha realizado contando con la limitación del proceso computacional, este puede verse completado mediante estudios posteriores. De tal manera, mas velocidades de cálculo podrían añadirse completando las gráficas con más puntos para los regímenes estudiados, siendo estas más precisas. También incluyendo simulaciones a velocidades pertenecientes a otros regímenes que no se han estudiado, caracterizando estos.

Modificar las características del lecho, puede ser motivo de estudios posteriores, y de este modo comparar los resultados con estudios ya realizados. Modificar, ya sean las características geométricas o las características propias del lecho, como el fluido de trabajo, o el tipo de partículas, puede dar lugar a estudios posteriores, en pos de comparar y establecer patrones.

Basar las simulaciones en otros modelos de cálculo, y comparar los resultados con información de estudios ya realizados también puede ser interesante, o que el mismo estudio compare distintos modelos, como se ha realizado en el presente proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann (1991)
- [2] Y. T. Makkawi, P. C. Wright, Fluidization regimes in a conventional fluidized bed Characterized by means of electrical capacitance tomography, Chemical Engineering Science (2002)
- [3] F. Taghipour, N. Ellis, C. Wong, Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics, Chemical Engineering Science (2005)
- [4] S. Sánchez-Delgado, C. Marugán-Cruz, A. Acosta-Iborra, D. Santana, Dense-phase velocity fluctuation in a 2-D fluidized bed, Powder Technology (2010)
- [5] T. Weldeabzgi, M. Schreiber, H. J. Krautz, Numerical simulation and experimental validation of bubble behavior in 2D gas-solid fluidized beds with immersed horizontal tubes, Chemical Engineering Science (2011)
- [6] D. Geldart, Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7 (1973) 285 – 292
- [7] A. Acosta-Iborra, C. Sobrino, F. Hernández-Jiménez, M. de Vega, Experimental and computational study on the bubble behavior in a 3-D fluidized bed, Chemical Engineering Science (2011)
- [8] F. Hernández-Jiménez, S. Sánchez-Delgado, A. Gómez-García, A. Acosta-Iborra, Comparison Between two fluid model simulations and particle image analysis & velocimetry (PIV) results for a two-dimensional gas-solid fluidized bed, Chemical Engineering Science (2011)
- [9] M. Rhodes, Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons (1998)
- [10] FLUENT 12.1.2 CFD software User Guide
- [11] GAMBIT 2.4.6 Tutorial Guide